

*EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG
ZUR BELASTBARKEIT
VON SCHRAUBENVERANKERUNGEN
IM WIRBELKÖRPER*

Axel NEUMANN

1901

Dissertations- und Fotodruck ANNELIESE SCHUBERT
Corneliusstraße 21 · 8000 München 5 · Telefon 268177



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41549025_0032

Aus der Orthopädischen Klinik und Poliklinik
der Universität München

Direktor: Prof. Dr. A.N. Witt

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG ZUR BELASTBARKEIT
VON SCHRAUBENVERANKERUNGEN IM WIRBELKÖRPER

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde in der gesamten Medizin
an der Ludwig-Maximilian-Universität zu München

vorgelegt von

Axel Neumann
aus
Berlin

München 1981

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter: Priv.-Doz.Dr. WIRTH

Mitberichterstatter: Prof.Dr. WITT

Dekan: Prof.Dr. SPANN

Tag der mündlichen Prüfung: 30.7.1981



IN LIEBE
MEINEM VATER GEWIDMET

INHALTSVERZEICHNIS

=====

EINLEITUNG

1. METHODIK UND VERSUCHSAUFBAU
 - 1.1 Untersuchungsgut und Versuchsvorbereitung
 - 1.2 Instrumentarium und Instrumentationstechnik
 - 1.3 Prüfmaschine
 - 1.4 Versuchsdurchführung
 - 1.4.1 Axialer Zug
 - 1.4.2 Verticaler Zug
 - 1.4.2.1 Verticaler Zug bei Normalverschraubung
 - 1.4.2.2 Verticaler Zug bei Diagonalverschraubung
 - 1.4.2.3 Vergleich Normalverschraubung - Diagonalverschraubung - Zusatzimplantate
2. ERGEBNISSE
 - 2.1 Versuche mit axialem Zug
 - 2.2 Versuche mit verticalem Zug in Richtung der Wirbelsäulenlängsachse von caudal nach cranial und umgekehrt
 - 2.2.1 Zug im Winkel von 90° zur Schraubenlängsachse
 - 2.2.1.1 Schraube ohne zusätzliches Implantat
 - 2.2.1.2 Schraube mit zusätzlicher Implantation einer Winkelplatte
 - 2.2.1.3 Schraube mit und ohne Winkelplatte
Vergleich an benachbarten Wirbelkörpern
 - 2.2.1.4 Schraube mit und ohne umgekehrt implantierte Winkelplatte
Vergleich an benachbarten Wirbelkörpern
 - 2.2.1.5 Schraube allein - Schraube mit Unterlegscheibe - Schraube mit Winkelplatte
Vergleich an benachbarten Wirbelkörpern

- 2.2.2 Diagonalverschraubung im Wirbelkörper
 - 2.2.2.1 Winkel + 45° zur horizontalen Normalverschraubung
 - 2.2.2.2 Vergleich von Normalverschraubung und Diagonalverschraubung von + 45° in Zugrichtung
 - 2.2.2.3 Vergleich Diagonalverschraubung + 45° - Normalverschraubung - Diagonalverschraubung - 45°
 - 2.2.2.4 Vergleich Winkelplatte - Diagonalverschraubung + 45° in Zugrichtung
- 2.2.3 Gegenmutter - Vergleich mit anderen Implantationsmethoden

DISKUSSION

ZUSAMMENFASSUNG

LITERATURVERZEICHNIS

LEBENS LAUF

EINLEITUNG

=====

Schon in vorchristlicher Zeit gibt es durch Hippocrates (12) Hinweise auf das Problem der Wirbelsäulendeformitäten und auf Versuche, diese durch starken Zug in Körperlängsachse zu korrigieren. Auch Galen (10) beschäftigte sich mit physiologischen und pathologischen Wirbelsäulen-Krümmungen und prägte die Begriffe Kyphosis, Lordosis und Skoliosis. In der Folgezeit wurden die unterschiedlichsten Theorien zu Ätiologie, Pathogenese und Therapie der Skoliose vorgetragen - so sah Ambroise Paré (22) den Hauptaspekt in der Ätiologie der Skoliose in vorbestehenden Haltungsehlern der Patienten und schlug als therapeutische Maßnahme u.a. ein Stahlkorsett vor, das er von Waffenschmieden anfertigen ließ. Noch im 19. Jahrhundert bestand die aktive Therapie im wesentlichen in verticaler und horizontaler Distraction des Patienten auf eigens zu diesem Zweck hergestellten Betten und Gerüsten. Außerdem begann man chirurgische Maßnahmen zu ergreifen und versuchte zum Beispiel, durch Myotomien (Guerin 1839) (12), Rippen-Resektionen (Volkmann 1829) (24) und Halbwirbelresektionen (Cochwilla 1901) (3) eine Korrektur zu erzielen. Im 20. Jahrhundert lag der Schwerpunkt dann auf der Suche nach operativen Maßnahmen, die nicht nur eine adäquate Korrektur der skoliotischen Deformität, sondern vor allem auch eine zuverlässige Retention des Korrekturergebnisses garantierten. So beschreibt Histo (16) 1911 erstmals die Möglichkeit einer operativen Wirbelsäulenfusion am Beispiel einer Wirbelkörper-Tuberkulose und veröffentlicht 1931 (17) zusammen mit Risser und Ferguson einen Bericht über 360 Fälle von Fusionen an skoliotischen Wirbelsäulen. Henle (15) 1924 und Albee (11) 1930 berichteten über Fusions-techniken mit Hilfe von autologen Knochentransplantaten. Risser (23) veröffentlicht 1948 wichtige Aspekte zur Praxis

der Skoliosenbehandlung. 1958 gibt die Arbeit von Moe (21) Auskunft über die Bedeutung der kleinen Wirbelgelenke für die Fusion von Wirbelkörpern. Bis heute wegweisend war dann die 1962 von Harrington (14) angegebene Methode, einen Metallstab zu implantieren. Er erzielte damit große Distraktionskräfte zur Aufrichtung der Krümmung und schuf eine hervorragende Möglichkeit zur Retention des Korrekturergebnisses.

In letzter Zeit gewinnen bei entsprechender Indikationsstellung zunehmend die Operationsverfahren mit ventralem Zugang zur Wirbelsäule an Bedeutung. Die Idee zur Korrektur der Skoliose über einen vorderen Zugang zur Wirbelsäule mit Einbringung eines besonderen Implantatsystems an den Wirbelkörpern geht auf Dwyer (6) zurück, der erstmals 1969 über diese Methode berichtete. Zielke (26, 27, 28, 29, 30, 31, 32) benutzte den gleichen operativen Zugang, entwickelte jedoch ein neues Instrumentarium, mit dem bis heute sehr ausgiebige und wirkungsvolle Korrekturen vorgenommen werden können. Dabei werden nach Excision der Bandscheiben an der Konvexität der skoliotischen Krümmung Schrauben in die Wirbelkörper eingebracht, über die mit Hilfe eines in die Schraubenköpfe eingelegten Kabels bzw. Gewindestabes Kompressionskräfte an der Konvexität aufgebracht und damit eine Aufrichtung der Krümmung erzielt werden kann. Während bei den dorsal distrahierenden Verfahren nach Harrington die Krafteinleitung des Systems nur über 2 Verankerungspunkte im obersten und untersten Wirbelbogen der Korrekturstrecke erfolgt, wird die Korrektur bei den ventral komprimierenden Verfahren nach Dwyer und Zielke durch Schraubenverankerung des Implantatsystems in jedem Segment der Korrekturstrecke erreicht. Art und Belastbarkeit dieser Krafteinleitung im menschlichen Wirbelkörper in vitro am Beispiel des Instrumentariums nach Zielke ist Gegenstand dieser experimentellen Untersuchung.

1. METHODIK UND VERSUCHSAUFBAU =====

1.1 Untersuchungsgut und Versuchsvorbereitung

Wir haben Versuche zur Ausreißfestigkeit von Schrauben vorgenommen, die zum Instrumentarium der von Zielke 1975 angegebenen, ventralen Derotationsspondylodese (VDS) gehören. Die Untersuchung wurde an 34 menschlichen Wirbelsäulen-Präparaten vorgenommen; die Altersverteilung lag zwischen 6 und 73 Jahren, die Geschlechtsverteilung bei $m = 25$ und $w = 9$.

Geprüft wurde die Schraubenverankerung an insgesamt 185 Wirbelkörpern aus den Segmenten Brustwirbelkörper 2 - Lendenwirbelkörper 5. Die Wirbelsäulen wurden nach der Entnahme schockgefrostet und gelangten nach einer durchschnittlichen Aufbewahrungszeit von 5 - 6 Tagen zum Versuch.

Die Auftauzeit betrug im Mittel 12 Stunden bei Zimmertemperatur unter Luftabschluß. Die aufgetauten Wirbelsäulen bzw. Wirbelsäulen-Abschnitte wurden bis auf Bandscheiben und Längsbänder von Hand skelettiert und dann von den Bogenanteilen befreit, indem diese an der Bogenwurzel abgesetzt wurden. Dies diente dazu, die bestmögliche Befestigung des Präparates in der Haltevorrichtung zu erzielen. Anschließend fertigten wir von jedem Präparat ein Röntgenbild (50 - 55 KV und 0,04 msec.) zur Strukturbeurteilung, um traumatische oder degenerative Veränderungen an den Wirbelkörpern dokumentieren zu können (Abb. 1). Als Wirbelsäulen-Halterung (Abb. 2) dienten 15 cm lange Stahlröhren verschiedenen Durchmessers, die an einer Seite mit einem Stahlboden verschlossen wurden. In Längsrichtung wurde bis in den Röhrenboden hinein ein 15 mm breiter Schlitz gefräst. In diese so vorbereiteten Röhren hinein legten wir der Röhrenlänge von 15 cm entsprechend die zuvor instrumentierten Wirbelsäulen-Abschnitte von 4 - 6 Segmenten. Um Eigenbewegungen des Präparates in

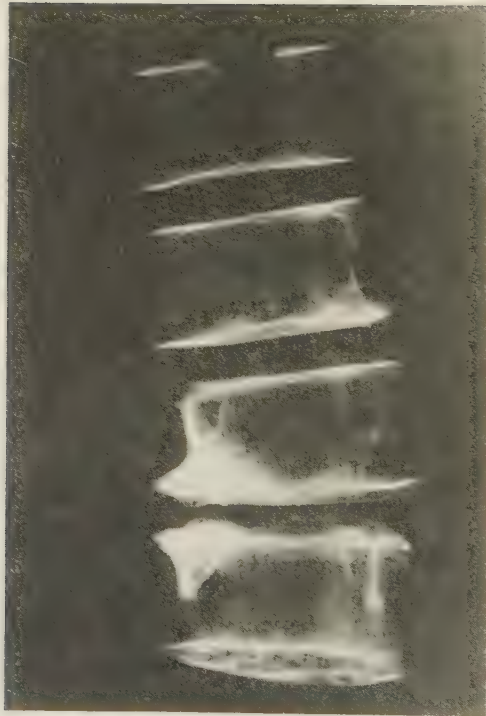


Abb. 1: Wirbelsäulenpräparat mit degenerativen Veränderungen

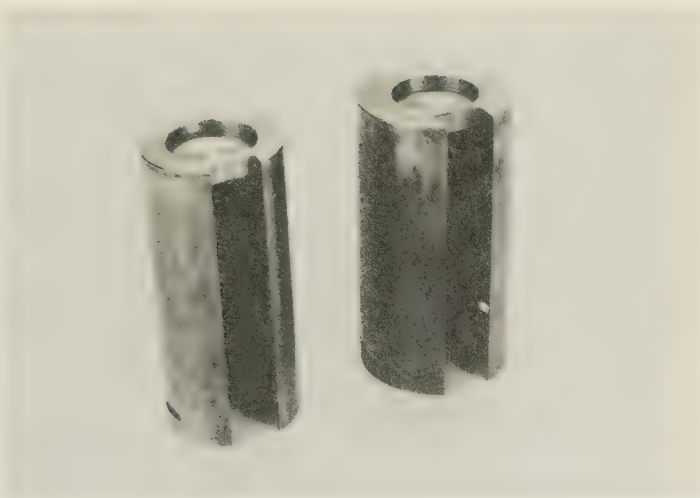


Abb. 2: Röhrenhalterung

der Halterung während des Versuches möglichst auszuschließen, füllten wir evtl. verbliebene Hohlräume mit vorbereiteten Holzkeilen aus. Die Instrumentation erfolgte immer an nur jeweils einem Wirbelkörper des Präparates, nach Beendigung des Versuches wurde das Implantat ausgewechselt und der nächste, benachbarte Wirbelkörper verschraubt.

1.2 Instrumentarium und Instrumentationstechnik

Aus dem Instrumentarium für die ventrale Derotationsspondylodese nach Zielke kamen zur Verwendung: Schrauben von 25 - 55 mm Gewindelänge (Abb. 3), Unterlegscheiben der Größe 1 und 2 (Abb. 4) und die Winkelplatten mit der Größenbezeichnung R 1 - 3 bzw. L 1 - 3 (Abb. 5).

Zur Instrumentation benutzten wir das dazugehörige Spezialwerkzeug der Firma Ullrich, Ulm. Zusätzlich verwendeten wir die von Griss (11) angegebene Klemmscheibe mit der dazugehörigen Schraube (Abb. 6) und die von Zielke (27) vorgeschlagene Gegenmutter mit Spezialschraube (Abb. 7), die, am obersten korrekturbedürftigen Segment gegengeschraubt, zu erhöhter Ausreißfestigkeit führen soll.

Zur Instrumentation bohrten wir in die Mitte der seitlichen, leicht konkaven Corticalis des Wirbelkörpers ein kleines Loch als Ansatzpunkt für das Schraubengewinde und brachten dann mit Hilfe eines speziellen Schraubenziehers (Fa. Ullrich, Ulm) die selbstschneidende Schraube in den Wirbelkörper ein. Die Schraubenlänge wurde dabei so gewählt, daß der Schraubenkopf der Corticalis schlüssig anlag und die gegenüberliegende Corticalis genau mit den letzten Gewinderängen gefaßt wurde, so daß nur die Schraubenspitze auf der Gegenseite hervorragte. Bei den Versuchen, in denen die Ausreißfestigkeit der Schraube bei nur einer gefaßten Corticalis

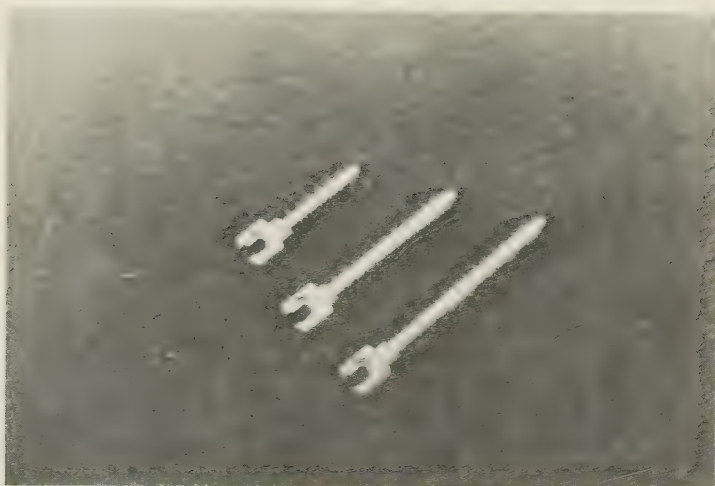


Abb. 3: Schrauben

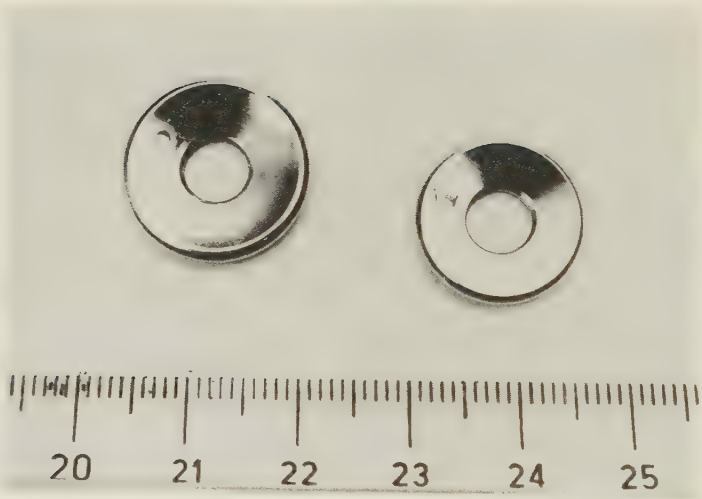


Abb. 4: Unterscheiben

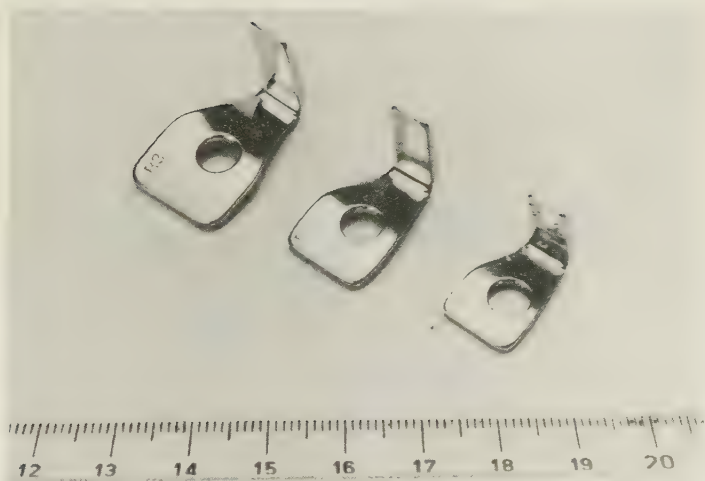


Abb. 5: Winkelplatten

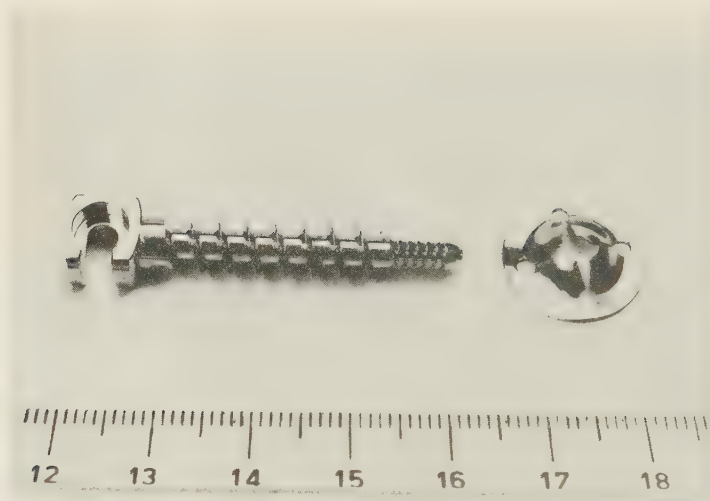


Abb. 6: Schraube mit Klemmscheibe



Abb. 7: Spezialschraube mit Gegenmutter

geprüft wurde, drehten wir die Schraube gerade um den Corticalis-Durchmesser von 2 - 3 mm zurück, um sicherzustellen, daß ein Maximum an Spongiosa von der Schraube erfaßt wurde. Um einen direkten Vergleich zu ermöglichen, verwendeten wir für die Versuche mit 2 oder nur einer gefaßten Corticalis jeweils denselben Wirbelkörper, wobei darauf geachtet wurde, daß die zweite Schraube nicht in denselben Schraubenkanal eingebracht wurde. Die Lage der Schrauben im Wirbelkörper wurde vor den Versuchen röntgenologisch kontrolliert (Abb. 8). Für die Versuche mit Winkelplatten wählten wir jeweils die Plattengröße, die gerade noch implantierbar war, ohne die Grund- bzw. Deckplatte des Wirbelkörpers zu beschädigen. Beim Einschlagen achteten wir insbesondere auf größtmögliche Kongruenz der konkaven Plattenfläche mit der Konkavität der seitlichen Wirbelkörper-Corticalis. Nach dem Einschlagen der Platte verschraubten wir diese in der oben angegebenen Weise, wobei immer beide Corticales gefaßt wurden. Der Schraubenkopf schloß dabei bündig mit der Plattenfläche ab. Der korrekte Sitz des Implantatsystems wurde ebenfalls vor dem Versuch röntgenologisch überprüft (s. Abb. 8).

Von den leicht konkaven Unterlegscheiben benutzten wir ebenfalls immer diejenige Größe, die die größtmögliche Kongruenz mit der seitlichen Corticalis aufwies. Auch hier achteten wir sorgfältig darauf, daß der Schraubenkopf bündig der Unterlegscheibe anlag und beide Corticales gefaßt waren.

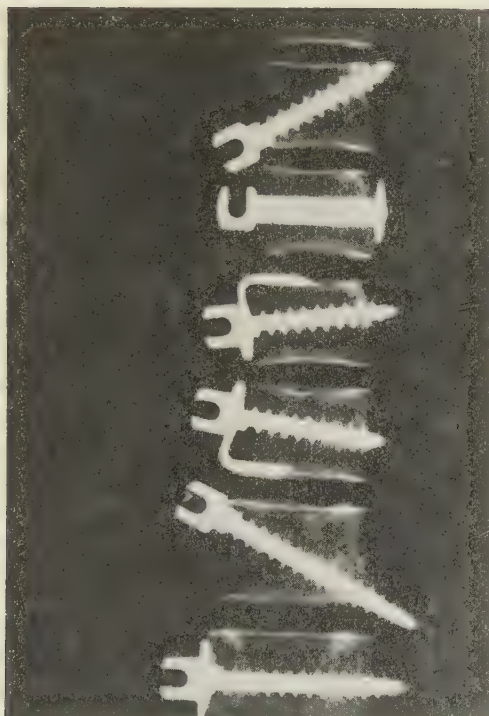


Abb. 8: Röntgenologische Kontrolle nach Implantation

1.3 Prüfmaschine

Das Wirbelsäulen-Präparat mit dem instrumentierten Wirbelkörper wurde dann in eine der Stahlröhren von entsprechendem Durchmesser gelegt und die Röhre an der Prüfmaschine befestigt. Wir verwendeten eine Universalprüfmaschine der Firma Zwick (Abb. 9). Die Krafteinleitung erfolgte weggesteuert über eine Traverse, auf der die Röhrenhalterung mit dem Präparat befestigt war. Der Schraubenkopf war durch den eingefrästen Schlitz über ein Gestänge mit einer feststehenden Kraftmeßdose verbunden, von der sich die Traverse mit einer konstanten Geschwindigkeit von 10 mm pro Min. wegbewegte. Die bis zum Schraubenausriß aufgewendete Kraft in Abhängigkeit von der Traversenbewegung wurde als Kraft-Weg-Diagramm aufgezeichnet.

1.4 Versuchsdurchführung

1.4.1 Axialer Zug

Zu Beginn unternahmen wir an insgesamt 27 Wirbelkörpern aus 18 Wirbelsäulen Versuche mit axialem Zug, das heißt mit Zug in Richtung der Schraubenlängsachse, um einen allgemeinen Überblick über die Ausreißfestigkeit der Schrauben in Abhängigkeit von der Segmenthöhe zu erhalten. Hierbei wurde an demselben Wirbelkörper die Schraube zunächst in beide, im nächsten Versuch in nur eine Corticalis eingedreht, um die Bedeutung der Corticalis für die Ausreißfestigkeit zu zeigen. Die Röhrenhalterung wurde dabei liegend auf der Traverse befestigt, der lotgerechte und damit streng axiale Zug war durch die gelenkige Aufhängung des Gestänges an der feststehenden Kraftmeßdose gewährleistet (Abb. 10).

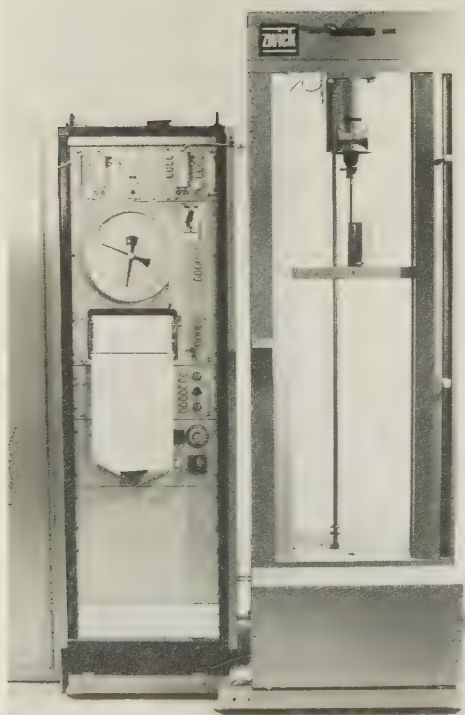


Abb. 9: Prüfmaschine

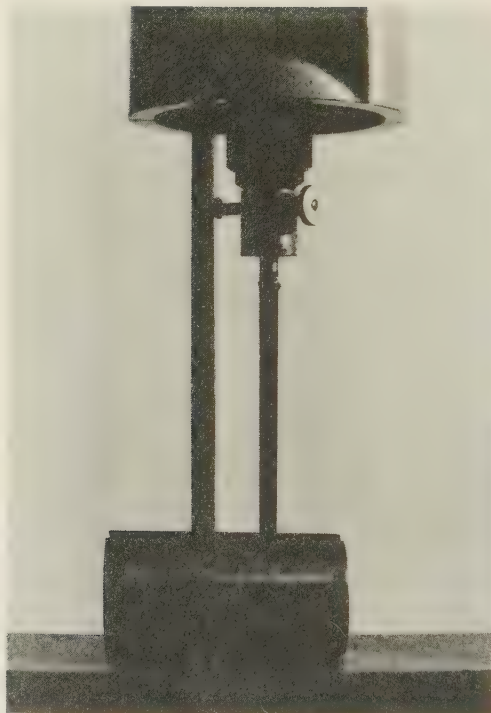


Abb. 10: Versuchsaufbau bei axialem Zug

1.4.2 Verticaler Zug

1.4.2.1 Verticaler Zug bei Normalverschraubung

In den folgenden Versuchen simulierten wir an 37 Wirbelkörpern aus 34 Wirbelsäulen die intraoperativ auf die Schraube wirkende Kraft durch verticalen Zug, das heißt durch Zug in Richtung der Wirbelsäulen-Längsachse von caudal nach cranial an den Lendenwirbelkörpern und von cranial nach caudal an den Brustwirbelkörpern. Diese Belastungsrichtung entspricht in der Regel der Krafteinwirkung in der operativen Praxis.

Daraus resultiert ein Winkel von 90 Grad von Zugrichtung zur Schraubenlängsachse (vgl. auch Abb. 12). Hierzu befestigen wir die Röhrenhalterung stehend auf der Traverse mit dem Boden nach oben, der lotgerechte und somit rechtwinklige Zug war durch die oben beschriebene Aufhängung des Gestänges an der Kraftmeßdose und die Einfräsung des Schlitzes bis in den Stahlboden der Röhre hinein gewährleistet (Abb. 11).

Die Versuche mit verticalem Zug wurden zunächst ohne und dann mit zusätzlicher Implantation einer Winkelplatte, Unterlegscheibe oder Gegenmutter gefahren, um die Auswirkung der zusätzlichen Implantate auf die Ausreißfestigkeit der Schraube zu zeigen. Um einen direkten Vergleich zu ermöglichen und Unterschiede in der Belastbarkeit der Wirbelsäulen verschiedener Individuen auszuschalten, instrumentierten wir hierzu immer zwei benachbarte Wirbelkörper derselben Wirbelsäule.

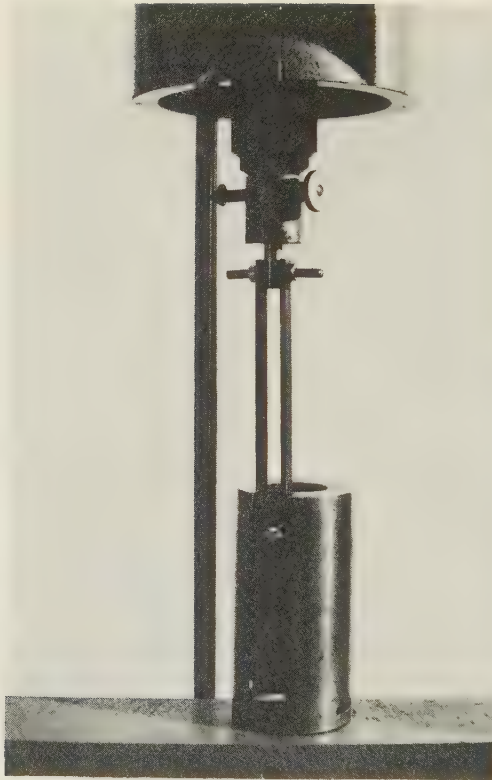


Abb. 11: Versuchsaufbau bei verticalem Zug

1.4.2.2 Vertikaler Zug bei Diagonalverschraubung

Durch die bis dahin gemachten Beobachtungen angeleitet, unternahmen wir in der Folge Versuche mit verticalem Zug an 7 weiteren Wirbelsäulen, in denen wir die Zielkeschrauben schräg im Wirbelkörper verschraubten, das heißt in einem Winkel von ca. $+ 45^\circ$ und $- 45^\circ$ zur normalen horizontalen Verschraubung. Dabei ist zu beachten, daß beim schrägen Einbringen der Schraube in den Wirbelkörper eine Kongruenz des Schraubenkopfes mit der Wirbelkörper-Corticalis nicht herzustellen war, da die Schrauben nicht für diese Versuchsanordnung konstruiert sind.

Im übrigen erfolgte die Instrumentierung in der oben angegebenen Weise, das heißt, es wurden beide Corticales sicher gefaßt und die Schraubenlänge so gewählt, daß nur die Spitze auf der Gegenseite hervorragte (s. Abb. 8). Diesen Versuchen zugrunde lag der Wunsch, mit Hilfe einer einfachen Veränderung der Implantationsmethode die Schrauben vermehrt durch axialen Zug zu belasten und somit ihren biomechanischen Eigenschaften besser gerecht zu werden. Die Abb. 12 gibt einen schematischen Überblick über die aus normaler horizontaler Verschraubung, wie in vivo praktiziert, und diagonalen Verschraubung im Wirbelkörper resultierenden Zugkräfte. Bei Normalverschraubung und verticalem Zug in Richtung der Wirbelsäulen-Längsachse von caudal nach cranial ist die Schraube keinem axialen Zug ausgesetzt, der Zug erfolgt im Winkel von 90° zur Schraubenlängsachse. Bei diagonalen Verschraubung in und entgegengesetzt der Zugrichtung (Winkel α ca. $+ 45^\circ$ bzw. $- 45^\circ$) resultiert die auf die Schraube wirkende Zugkraft aus rechtwinkligen (K 1) und axialen Zugkräften (K 2), das heißt, die Schraube wird teilweise biomechanisch günstig belastet. Grundlage dafür sind einfache mathematische Überlegungen, dargestellt in Abb. 13 und Tab. 1. Das Kräfteparallelogramm in Abb. 13 zeigt

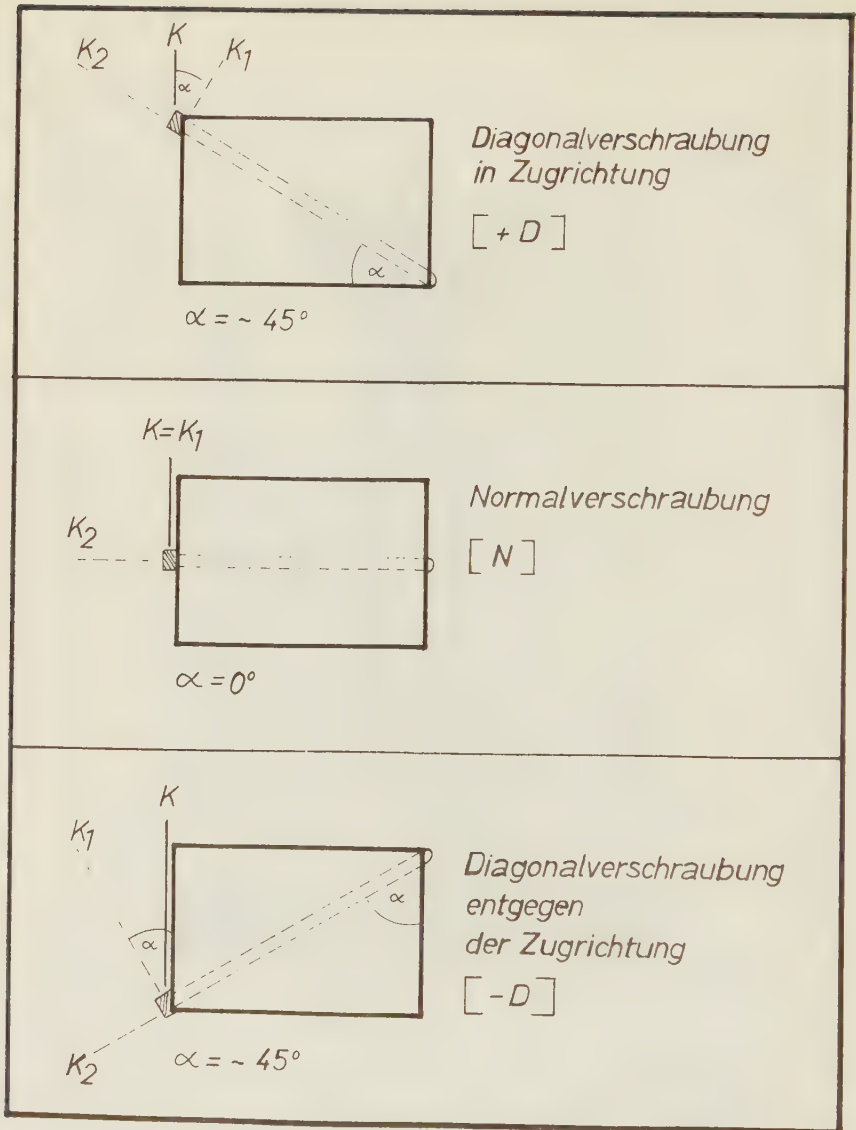


Abb. 12: Zugkräfte

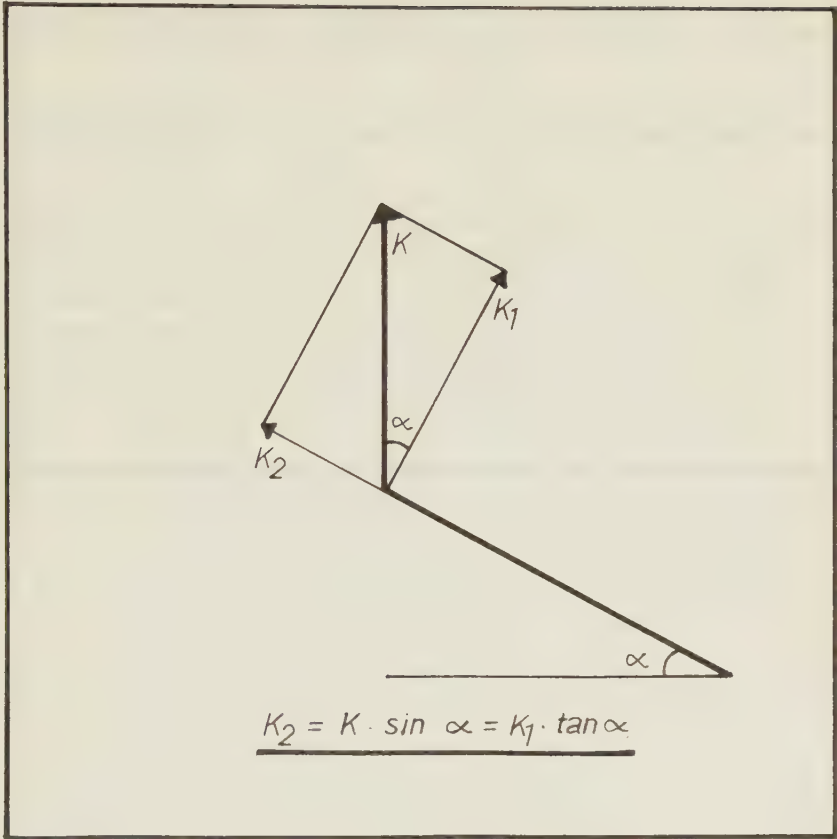


Abb. 13: Kräfteparallelogramm

α	K_1	K_2
0°	K	0
30°	$K \cdot 0,87$	$K \cdot 0,5$
45°	$K \cdot 0,71$	$K \cdot 0,71$
60°	$K \cdot 0,5$	$K \cdot 0,87$

Tab. 1: Trigonometrie der resultierenden Zugkraft

die mathematischen Beziehungen zwischen K_1 und K_2 in Abhängigkeit von Winkel α . Bei $\alpha = 0^\circ$ entspricht $K = K_1$, das heißt, die Schraube ist ausschließlich rechtwinkligem Zug ausgesetzt, $K_2 = 0$. Dies sind die Verhältnisse bei Normalverschraubung (vgl. auch Abb. 12). Bei $\alpha = 30^\circ$ ist $K_2 = K \times 0,5$, das heißt, der Wert der axialen Zugkraft erreicht schon mehr als 50 % der rechtwinkligen Zugkraft ($K_1 = K \times 0,87$). Bei $\alpha = 45^\circ$, wie von uns durch Diagonalverschraubung in Zugrichtung annähernd erzielt, ist $K_1 = K_2$ ($K \times 0,71$), das heißt, die auf die Schraube wirkende Zugkraft resultiert zu gleichen Teilen aus axialem und rechtwinkligem Zug.

Auf die Diagonalverschraubung entgegengesetzt der Zugrichtung läßt sich dieses Modell nicht direkt anwenden, da in diesem Fall die Zugkraft K nicht der resultierenden Kraft K aus K_1 und K_2 entspricht, sondern ihr entgegenwirkt. Wir unternahmen diese Versuche, um den negativen Beweis führen zu können.

Bei allen Versuchen mit verticalem Zug brachten wir zusätzlich eine kleine gewinkelte Meßlehre in den betreffenden Wirbelkörper ein (Abb. 14), die es gestattete, Beginn und Ausmaß der Schraubenbewegung im Wirbelkörper in Abhängigkeit von der zu diesem Zeitpunkt eingeleiteten Kraft zu beurteilen und auf dem Diagramm zu vermerken. Die dabei gewonnenen Daten sind insofern von Bedeutung, als schon die geringfügige, röntgenologisch häufig nicht zu erkennende Lockerung des Implantates bzw. der Schraube im Wirbelkörper zur Instabilität des ganzen Systems und damit zum Korrekturverlust führen kann.



Abb. 14: Meßlehre (schem.)

1.4.2.3 Vergleich Normalverschraubung - Diagonalverschraubung - Zusatzimplantate

Zum Abschluß unternahmen wir dann Versuche, in denen wir Normalverschraubung, Diagonalverschraubung und die zusätzlichen Implantate (Winkelplatten, Unterlegscheiben, Gegenmutter) direkt miteinander verglichen. Hierzu instrumentierten wir wiederum zwei benachbarte Wirbelkörper derselben Wirbelsäule, um Fehler durch die beträchtlichen interindividuellen Unterschiede in der Wirbelkörperbelastbarkeit auszuschalten.

Die Ergebnisse der genannten Versuche gestalten sich wie folgt.

2. ERGEBNISSE

2.1 Versuche mit axialem Zug

In Abb. 15 ist der typische Kurvenverlauf bei Zug in Schraubenlängsachse dargestellt. Es zeigt sich ein schneller, steiler Kraftanstieg bis zu einem schmalen Gipfel, in der Folge kommt es zum ebenso raschen Abfall der Kurve gegen Null, d.h., bis zum Punkt der maximalen Auszugskraft sitzt die Schraube unverrückbar fest, reißt nach Überschreitung dieses Maximums jedoch sofort ohne nennenswerten Widerstand aus dem Wirbelkörper aus. Hierbei ist zu beachten, daß der bis zum Zeitpunkt des Schraubenausrisses zurückgelegte Versenweg von hier 5 mm nicht auf einer entsprechenden Schraubenzugbewegung beruht, sondern auf Minimalbewegungen des Präparates in der Halterung zurückzuführen ist. Bei allen Versuchen mit axialem Zug konnten wir bis zum Punkt des Ausrisses keine sichtbare Bewegung der Schraube im Wirbelkörper feststellen. Dabei war es nicht von Bedeutung, ob beide oder nur eine Corticalis gefaßt waren.

Die Abb. 16 zeigt die typischen Verhältnisse bei axialem Zug an Beispiel einer 27-jährigen männlichen Wirbelsäule. An jedem Wirbelkörper von Lendenwirbelkörper 4 bis Brustwirbelkörper 5 wurde ein axialer Zug angelegt, wobei im ersten Versuchsgang beide Corticales (= maximale Auszugskraft), im zweiten Versuchsgang nur eine Corticalis (= minimale Auszugskraft) gefaßt wurde. Beide Kurven zeigen einen steilen Abfall von caudal nach cranial. An Lendenwirbelkörper 4 beträgt die maximale Auszugskraft zum Zeitpunkt des Schraubenausrisses 182 DaN, an Brustwirbelkörper 5 nur noch 81 DaN. Die minimale Auszugskraft, also die eingeleitete Kraft zum Zeitpunkt des Schraubenausrisses bei nur einer gefaßten Corticalis, nimmt von 73 DaN an Lendenwir-



Abb. 15: Typischer Kurvenverlauf
Zugrichtung in Schraubenlängsachse

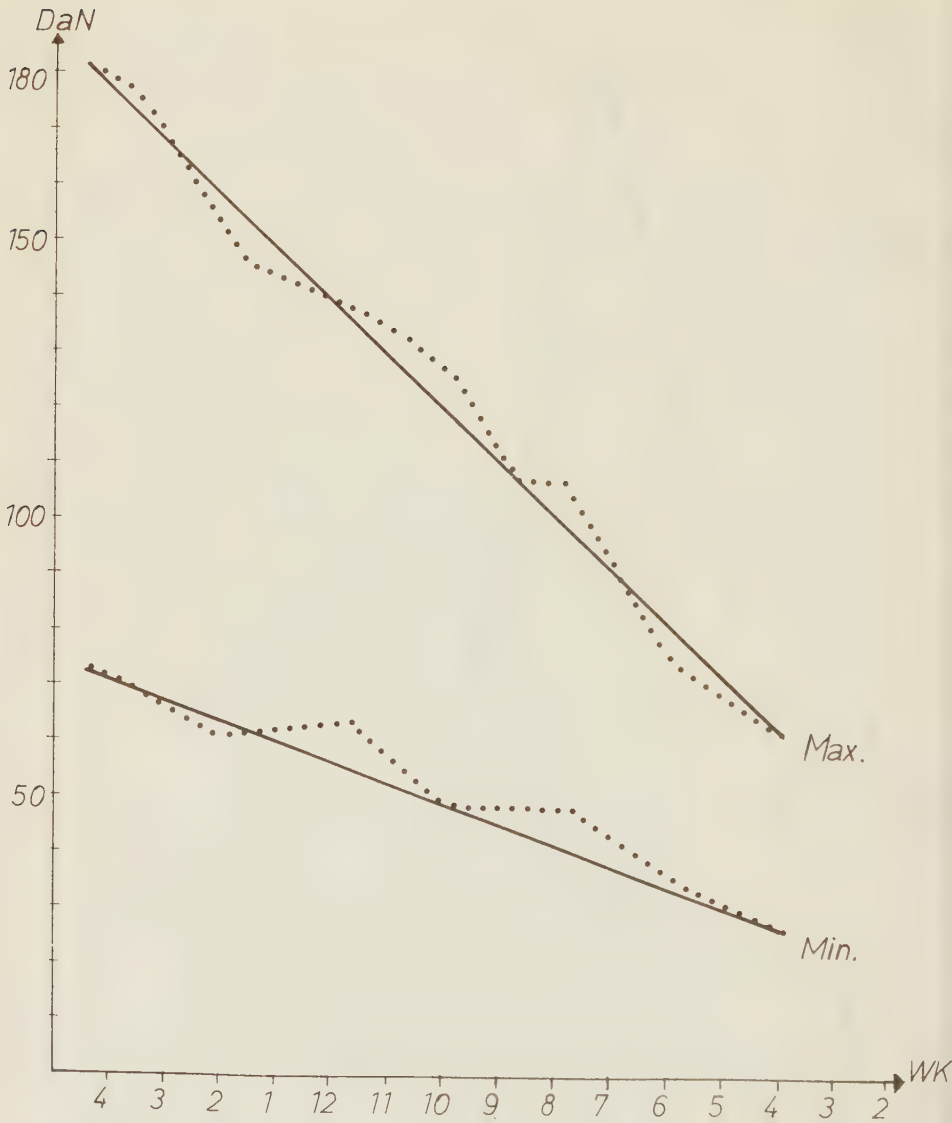


Abb. 16: Maximale und minimale Auszugskraft
Zugrichtung in Schraubenlängsachse

belkörper 4 auf 31 DaN an Brustwirbelkörper 5 ab. Es zeigt sich eine deutliche Abnahme der Wirbelkörper-Belastbarkeit von caudal nach cranial. Ersichtlich wird auch die Bedeutung der Corticalis für die Ausreißfestigkeit der Schrauben. Die bei nur einer gefaßten Corticalis zum Ausriß der Schraube erforderliche Zugkraft beträgt an Brustwirbelkörper 5 50 %, an Lendenwirbelkörper 4 nur 40 % der maximalen Auszugskraft. Ferner zeigt der Versuch, daß der Anstieg bzw. Abfall der Auszugskraft zwischen zwei benachbarten Wirbelkörpern im Mittel nur etwa 5 DaN beträgt, in der Größenordnung also vernachlässigbar ist. Aus diesem Grunde faßten wir für die Übersicht über die an allen Wirbelsäulen ermittelten Werte bei axialem Zug Lendenwirbelkörper 3 und 4, Brustwirbelkörper 11 und 12 sowie Brustwirbelkörper 6 und 7 zu jeweils einem Segment zusammen.

Die Abb. 17 zeigt die ermittelten Durchschnittswerte für die maximale und minimale Auszugskraft an 18 Wirbelsäulen bzw. 27 Wirbelkörpern. Die maximale Auszugskraft nimmt von durchschnittlich 136 DaN an Lendenwirbelkörper 3/4 über 112 DaN an Brustwirbelkörper 12/11 bis zu 46 DaN an Brustwirbelkörper 6/7 ab. Einen ähnlichen Verlauf zeigt die Kurve für die minimale Auszugskraft. An Lendenwirbelkörper 3/4 sind im Mittel 67 DaN, an Brustwirbelkörper 11/10 60 DaN, an Brustwirbelkörper 6/7 nur noch 26 DaN zum Ausriß der Schraube erforderlich. Die Ausreißfestigkeit der Schrauben nimmt von caudal nach cranial also erheblich ab, die Auszugskraft am Segment Brustwirbelkörper 11/12 beträgt nur 80 %, am Segment Brustwirbelkörper 6/7 nur 30 % der Auszugskraft am Segment Lendenwirbelkörper 3/4. Bemerkenswert ist besonders die starke Abnahme sowohl der maximalen als auch der minimalen Auszugskraft um etwa 55 % von Brustwirbelkörper 11/12 nach Brustwirbelkörper 6/7, die erhebliche Festigkeitsunterschiede innerhalb der Brustwirbelsäule aufzeigt.

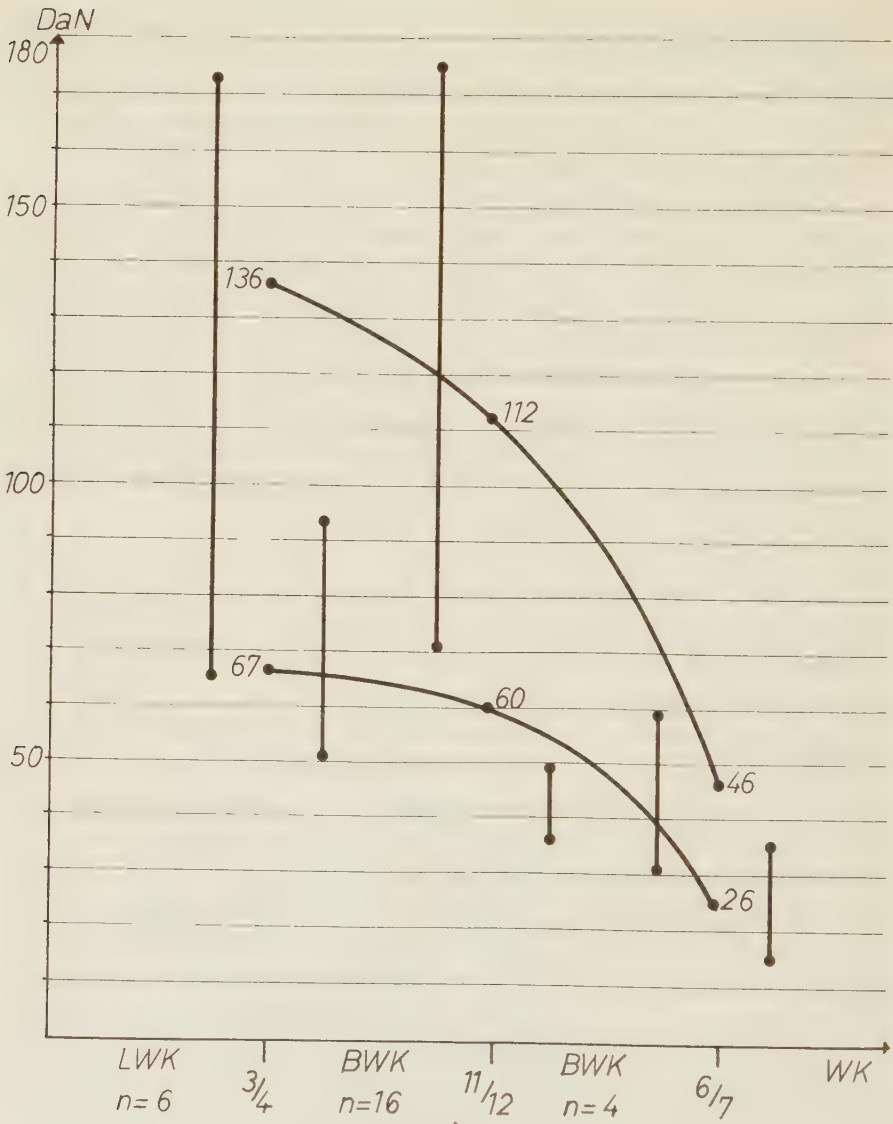


Abb. 17: Durchschnittswerte für maximale und minimale Auszugskraft
Zugrichtung in Schraubenlängsachse

Deutlich zum Ausdruck kommt wiederum die Bedeutung der Corticalis für die Haltekraft der Schraube im Wirbelkörper. Die Ausreißfestigkeit der Schraube bei nur einer gefaßten Corticalis beträgt an den untersuchten 27 Wirbelkörpern im Mittel nur 45 % der maximalen Ausreißfestigkeit.

Links und rechts der Mittelwerte sind die am jeweiligen Segment gemessenen größten und kleinsten Werte für maximale und minimale Auszugskraft aufgetragen, um die Streubreite aufzuzeigen. Schon in diesem Versuchsstadium wurden große interindividuelle Festigkeitsunterschiede, die nur teilweise durch die Altersverteilung zu erklären waren, deutlich. Die vor jedem Versuch angefertigten Röntgenbilder waren durchwegs unauffällig.

Der Spitzenwert für die maximale bzw. minimale Auszugskraft (176 bzw. 66 DaN) an Lendenwirbelkörper 3/4 wurde an einer 20-jährigen männlichen Wirbelsäule gemessen. Die geringsten Auszugskräfte an diesem Segment (94 bzw. 50 DaN) zeigte eine 40-jährige männliche Wirbelsäule. Der Spitzenwert an Brustwirbelkörper 11/12 stammt ebenfalls von einer 20-jährigen männlichen Wirbelsäule. Die kleinsten Werte erhielten wir von unserem jüngsten Versuchspräparat, einer 6-jährigen weiblichen Wirbelsäule (50 bzw. 36 DaN).

Die kleinsten an Brustwirbelkörper 6/7 gemessenen Werte (36 bzw. 15 DaN) entstammen ebenfalls der 6-jährigen Wirbelsäule, die Spitzenwerte wurden an einer 15-jährigen weiblichen Wirbelsäule gemessen.

Die erhebliche Abnahme der zum Ausriß der Schraube erforderlichen Zugkraft von caudal nach cranial sowie die Verminderung der Auszugskraft bei nur einer gefaßten Corticalis um mindestens 40 % ließ sich jedoch bei allen untersuchten Wirbelsäulen-Präparaten konstant aufzeigen.

2.2 Versuche mit verticalem Zug in Richtung der Wirbelsäulen-Längsachse von caudal nach cranial und umgekehrt

2.2.1 Zug im Winkel von 90° zur Schraubenlängsachse

2.2.1.1 Schraube ohne zusätzliches Implantat

Die Abb. 18 zeigt den typischen Verlauf des Kraft-Weg-Diagrammes für diese Versuche. Die Kurve steigt unstetig und langsam an, erfährt zu Beginn des letzten Drittels einen kräftigen Anstieg zum Maximum und fällt nach einer kurzen Plateau-Phase langsam und stetig ab. Der im Vergleich zum Kurvenbild bei axialem Zug langsamere und unstete Anstieg ist im wesentlichen auf zwei Ursachen zurückzuführen:

1. Die Schrauben bewegen sich unter der eingeleiteten Zugkraft in Zugrichtung, d.h., von caudal nach cranial, und reißen den Wirbelkörper auf. Dies erfolgt im Sinne einer Winkelbewegung, wobei sich der Schraubenkopf zunehmend der Wirbelkörper-Deckplatte nähert. Der Drehpunkt liegt etwa an der Schraubenspitze in der gegenüberliegenden seitlichen Corticalis (vgl. Abb. 19). Die Zugkraft wirkt also immer nur auf einen bestimmten Teil des Schraubengewindes.
2. Die im Gegensatz zum operativen Verfahren aus versuchstechnischen Gründen in vitro belassenen Bandscheiben ermöglichen während der Krafteinleitung eine geringe Kompression und Krümmung des Wirbelsäulen-Präparates in der stehenden Röhrenhalterung. Die Krafteinleitung bewirkt also eine gewisse Deformierung des Präparates in der Röhrenhalterung, insbesondere eine Kompression der belassenen Bandscheiben.

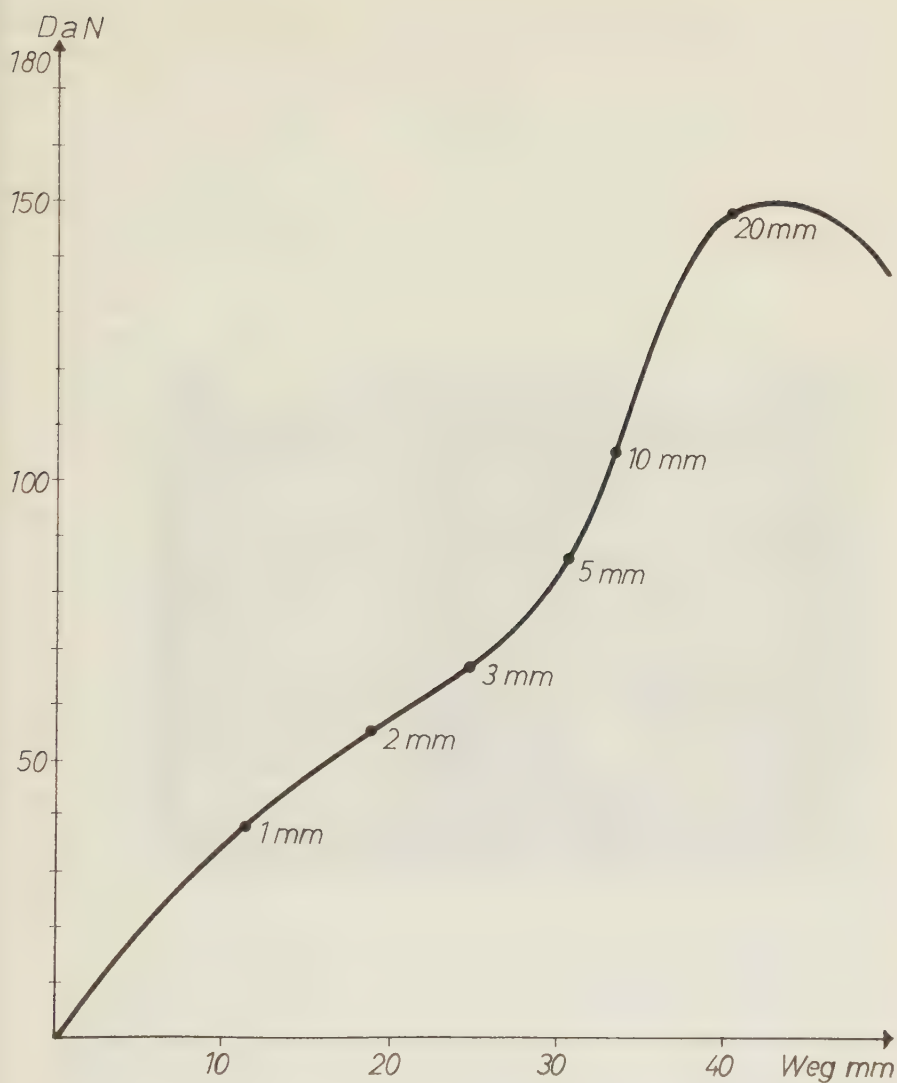


Abb. 18: Typischer Kurvenverlauf
Zugrichtung rechtwinklig zur Schraubenlängsachse

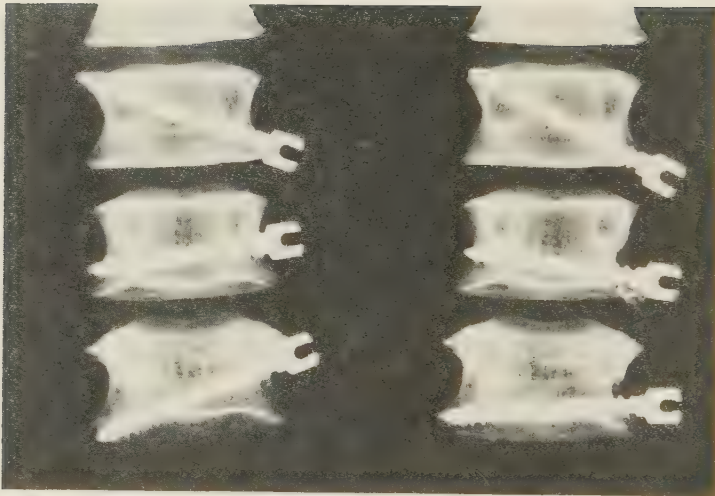


Abb. 19: Schraubenimplantate vor und nach Zug in Richtung
der Wirbelsäulenlängsachse

Diesem Problem begegneten wir, indem wir zusätzlich bei den Versuchen mit verticalem Zug das oben beschriebene Meßinstrument in den Wirbelkörper einbrachten, um die Bewegung der Schraube im Wirbelkörper unabhängig von den durch die Bandscheiben verursachten Bewegungen des Präparates beurteilen zu können. Der im Kraft-Weg-Diagramm angegebene Traversenweg entspricht also nicht der Schraubenbewegung im Wirbelkörper allein, sondern gibt die Summenbewegung aus Präparatverformung und Ausreißbewegung der Schraube wieder. Das Ausmaß der reinen Schraubenbewegung ist deshalb gesondert im Diagramm vermerkt. In diesem Beispiel beginnt die Bewegung (1 mm) bei einer Zugkraft von 38 DaN, bei eingeleiteten 87 DaN hat sich die Schraube bereits 5 mm bewegt, bei Erreichen des Zugkraftmaximums von 150 DaN hat sie den Wirbelkörper schon 20 mm nach cranial durchgeschnitten und reißt erst dann vollständig aus dem Wirbelkörper aus. Die Schraubenbewegung beginnt also bereits bei etwa 25 % der unter diesen Versuchsbedingungen erreichbaren maximalen Auszugskraft. Bei 87 DaN bzw. 5 mm Bewegung ist die Schraube bereits um etwa 25 - 30 % nach cranial gewandert, d.h., die Kraft wird jetzt etwa in einem Winkel von 90° plus 25° gleich 115° zur Schraubenlängsachse eingeleitet. Bei 150 DaN bzw. 20 mm beträgt dieser Winkel annähernd 35° ! Die Richtung der Zugkraft nähert sich mit zunehmender Versuchsdauer solange 180° , bis die Schraube aus dem zerstörten Wirbelkörper ausreißt. Die Anzahl der axial belasteten Gewindezüge der Schraube nimmt also proportional zur Winkelbewegung ständig zu. Wir sehen in dieser Tatsache die Erklärung für den zweiten, kräftigen Anstieg zu Beginn des letzten Drittels der Versuchskurve.

Die Abb. 20 zeigt nun die Übersicht über die mit verticalem Zug im Winkel von 90° zur Schraubenlängsachse durchgeführten Versuche an insgesamt 37 Wirbelkörpern aus 34 Wirbelsäulen. Wir ermittelten die Durchschnittswerte an den

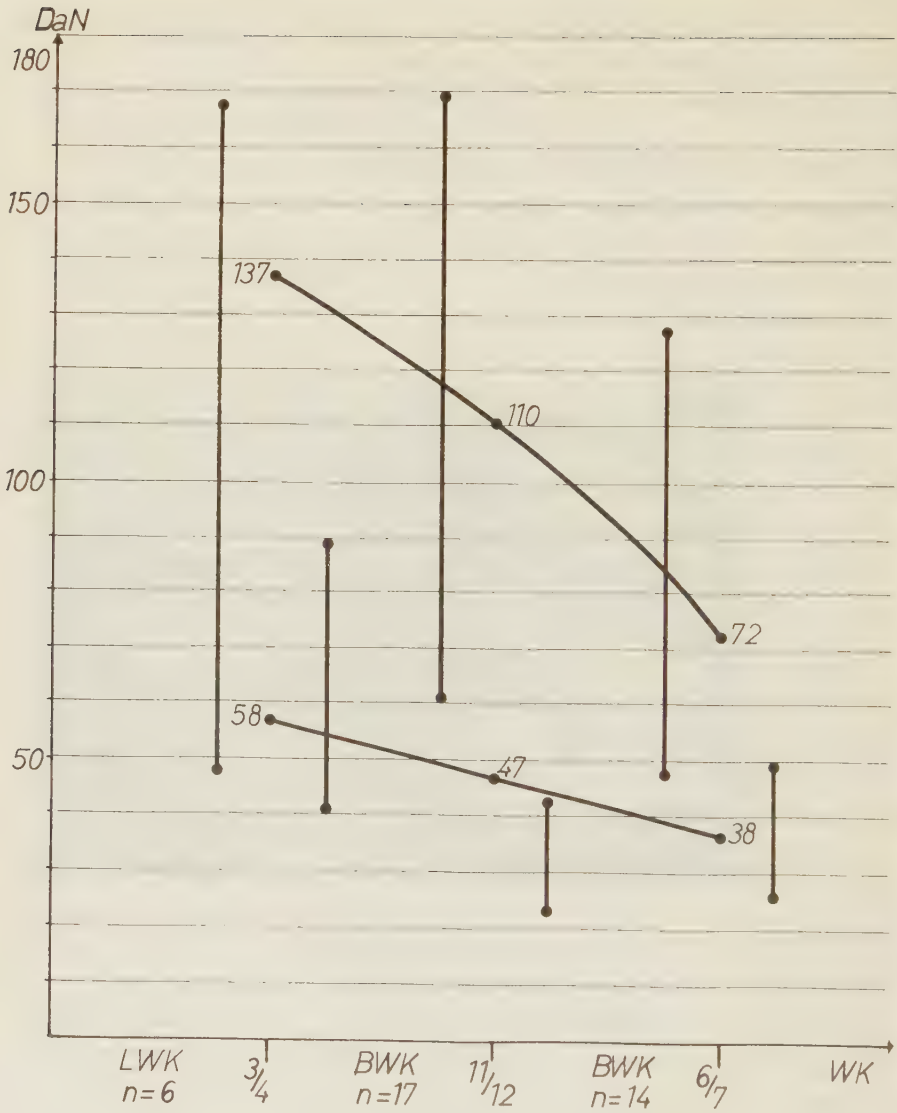


Abb. 20: Durchschnittswerte für maximale und minimale Auszugskraft
Zugrichtung rechtwinklig zur Schraubenlängsachse

Segmenten Lendenwirbelkörper 3/4, Brustwirbelkörper 11/12 und Brustwirbelkörper 6/7. Als Kriterium für die Belastbarkeit der Schraube im Wirbelkörper bzw. ihrer Auszugsfestigkeit galten erstens: der Beginn der Lockerung bzw. Bewegung der Schraube um 1 mm = minimale Auszugskraft und zweitens: die Zugkraft, bei der die Schraube, ohne weitere Kraft aufnehmen zu können, aus dem Wirbelkörper ausreißt = maximale Auszugskraft.

Die obere Kurve zeigt die maximale Auszugskraft, für das Segment Lendenwirbelkörper 3/4 beträgt sie im Durchschnitt 137 DaN, für Brustwirbelkörper 11/12 110 DaN und für Brustwirbelkörper 6/7 64 DaN, d.h., die maximale Auszugskraft nimmt von der mittleren Lendenwirbelsäule zur mittleren Brustwirbelsäule um etwa 47,5 % ab. Mit ca. 44,5 % etwas geringer ist die Abnahme der minimalen Auszugskraft. Sie betrug an Lendenwirbelkörper 3/4 im Mittel 58 DaN, an Brustwirbelkörper 11/12 47 DaN und an Brustwirbelkörper 6/7 38 DaN. Auch in dieser Versuchsreihe wurden große interindividuelle Unterschiede in der Belastbarkeit der Wirbelkörper deutlich. Die gemessenen Werte für die maximale und die minimale Auszugskraft schwankten am unteren Segment zwischen 168/48 DaN (28 j. m.) und 90/40 DaN (37 j. m.), am mittleren Segment zwischen 170/60 DaN (20 j. m.) und 43/23 DaN (73 j. m.). Im Falle der 73-jährigen Wirbelsäule ließ sich röntgenologisch eine deutliche Osteoporose der Wirbelkörper zeigen. Am oberen Segment betrug der größte gemessene Wert 128/48 DaN (37 j. m.), der kleinste 50/26 DaN (31 j. m.). Die minimale Auszugskraft betrug an Lendenwirbelkörper 3/4 42,3 % der maximalen Auszugskraft, an Brustwirbelkörper 11/12 42,7 % und Brustwirbelkörper 6/7 52,7 %. Schon bei durchschnittlich 45 % der theoretisch einleitbaren Kraft beginnt sich das Implantat also zu lockern. Dabei scheint die maximale Auszugskraft von caudal nach cranial etwas stärker abzunehmen als die minimale

Auszugskraft.

Die Tabelle 2 zeigt den Versuch, die in dieser Versuchsreihe am Segment Brustwirbelkörper 11/12 gemessenen Werte für die maximale Auszugskraft nach Altersgruppen aufzuschlüsseln. Aufgetragen sind dabei die für die betreffende Altersgruppe ermittelte durchschnittliche maximale Auszugskraft und ihre prozentuale Abweichung von dem an allen 17 Wirbelkörpern errechneten Durchschnittswert von 110 DaN. Auffallend ist dabei das günstige Abschneiden der Altersgruppe von 17 - 26 Jahren und die große negative Abweichung des 15-jährigen Präparates sowie der schon oben erwähnten 73-jährigen Wirbelsäule um 36 bzw. 61 %. Eine endgültige Aussage verbietet sich jedoch wegen der leider sehr unterschiedlichen Stichprobenzahlen.

2.2.1.2 Schraube mit zusätzlicher Implantation einer Winkelplatte

Die Abb. 21 zeigt den typischen Kurvenverlauf für die Versuche, in denen wir zusätzlich eine Winkelplatte in den Wirbelkörper einbrachten (Abb. 22). Die Kurve steigt langsam und stetig an, erreicht ein Plateau und fällt dann rasch und stetig wieder ab. Der Anstieg ist etwas steiler als in der Vergleichskurve (vgl. Abb. 18) für die Schraube allein, erreicht jedoch nicht den bei axialen Zug beobachteten Steilheitsgrad (vgl. Abb. 15).

Der Anstieg ist stetig, d.h., es erfolgt eine gleichmäßige Krafteinleitung auf das Implantatsystem, obwohl es auch in diesen Versuchen zum Wandern der Schraube in Zugrichtung und damit zu einer Winkelbewegung im Wirbelkörper kam. Das Ausmaß dieser Bewegung war jedoch deutlich geringer als in den vorangegangenen Versuchen ohne Winkelplatte. Die Winkelplatte selbst wurde durch die sich nach cranial bewegen-

<i>Altersgruppe</i>	<i>WS</i>	<i>Ermittelte max. Auszugskraft</i>	<i>Abweichung von der durchschnitt- lichen max. Auszugskraft</i>
$< 16 J.$	1	70	- 36%
17 - 26 J.	7	136	+ 23%
27 - 36 J.	5	97	- 12%
37 - 46 J.	3	111	+ 1%
$> 46 J.$	1	43	- 61%

Tab. 2: Altersverteilung

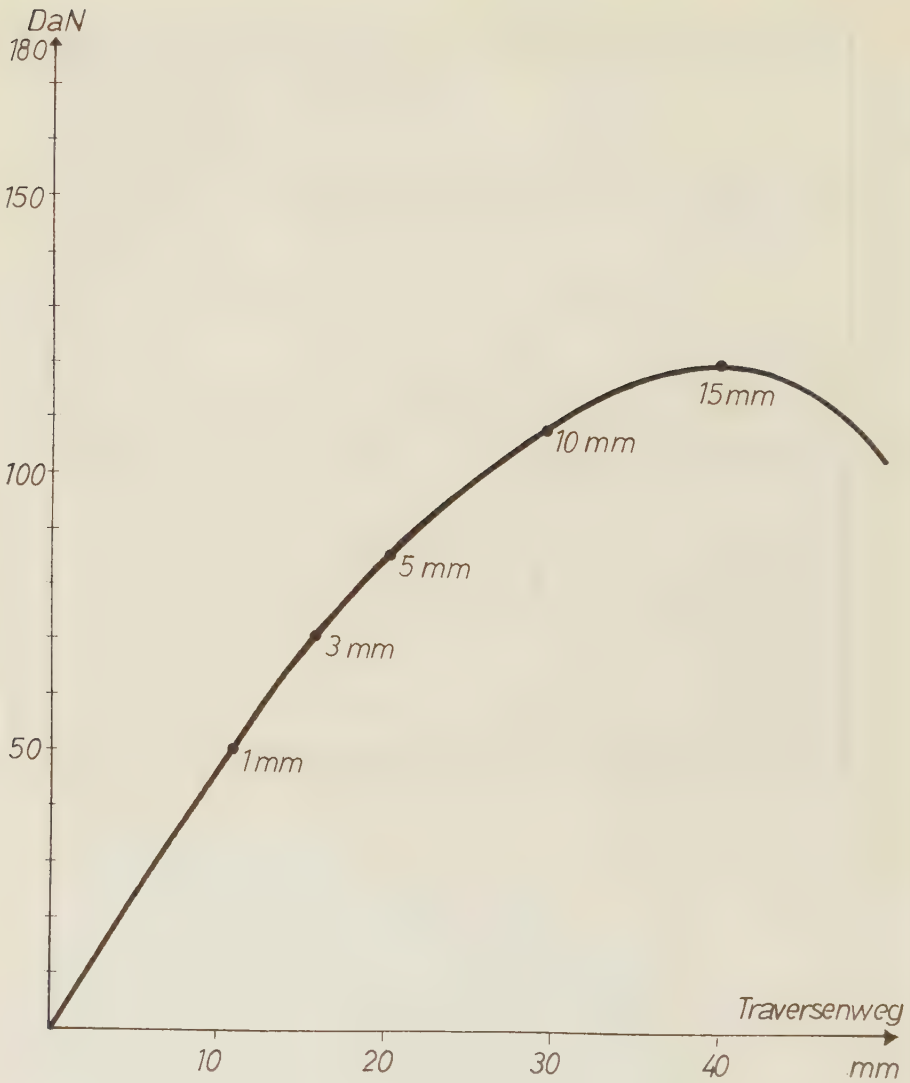


Abb. 21: Typischer Kurvenverlauf
Zugrichtung rechtwinklig zur Schraubenlängsachse
bei Implantation einer Winkelplatte

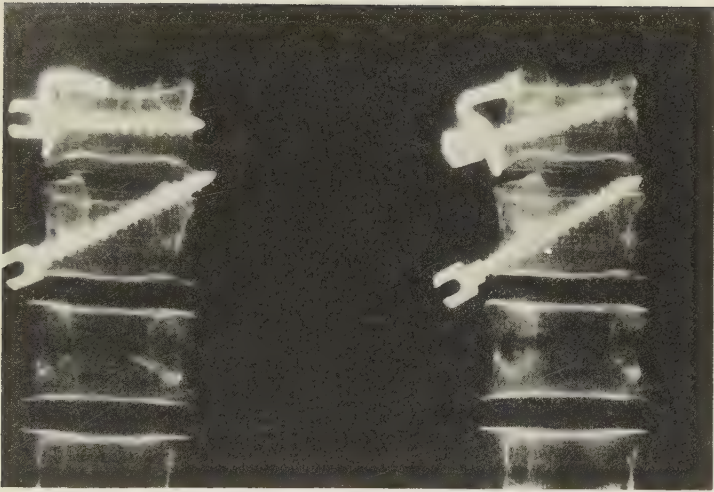


Abb. 22: Schrauben mit Winkelplatten vor und nach Zug

de Schraube zunehmend aus dem Wirbelkörper gehebelt und war bei Erreichen der maximalen Zugkraft im allgemeinen nahezu völlig aus dem Wirbelkörper ausgerissen. Auch in dieser Abbildung ist die Schraubenbewegung in mm in Abhängigkeit von der zu diesem Zeitpunkt eingeleiteten Kraft gesondert aufgetragen. Der Beginn der Bewegung um 1 mm liegt in diesem Beispiel bei 50 DaN (= minimale Auszugskraft). Bei 70 DaN hat sie sich um 3 mm, bei 85 DaN um 5 mm und bei 105 DaN bereits um 10 mm nach cranial bewegt. Auch während der Plateau-Phase erfolgt eine Schraubenbewegung, das Implantatsystem nimmt jedoch keine zusätzliche Kraft mehr auf. Der in diesem Beispiel erreichten maximalen Auszugskraft von 120 DaN entspricht eine Schraubenbewegung von 15 mm. Im Anschluß daran reißt das System Schraube/Winkelplatte vollständig aus.

Die folgende Abb. 23 zeigt die an insgesamt 14 Wirbelsäulen ermittelten Durchschnittswerte für maximale und minimale Auszugskraft an den Segmenten Brustwirbelkörper 11/12 und Brustwirbelkörper 6/7. An Brustwirbelkörper 11/12 (n=7) betrug die maximale Auszugskraft 111 DaN, die minimale Auszugskraft im Mittel 69 DaN, d.h., 61,1 % der maximalen. An Brustwirbelkörper 6/7 wurden für die maximale Auszugskraft durchschnittlich 76 DaN gemessen, mit 50 DaN betrug die minimale Auszugskraft im Mittel 65,7 % davon. Im Vergleich zu den vorhergegangenen Versuchen ohne Winkelplatte, bei denen die minimale Auszugskraft an Brustwirbelkörper 11/12 im Mittel 42,7 % und an Brustwirbelkörper 6/7 52,7 % der maximalen Auszugskraft betrug (vgl. Abb. 20), läßt sich eine Annäherung der minimalen an die maximale Auszugskraft zeigen, wenn zusätzlich eine Winkelplatte implantiert wird.

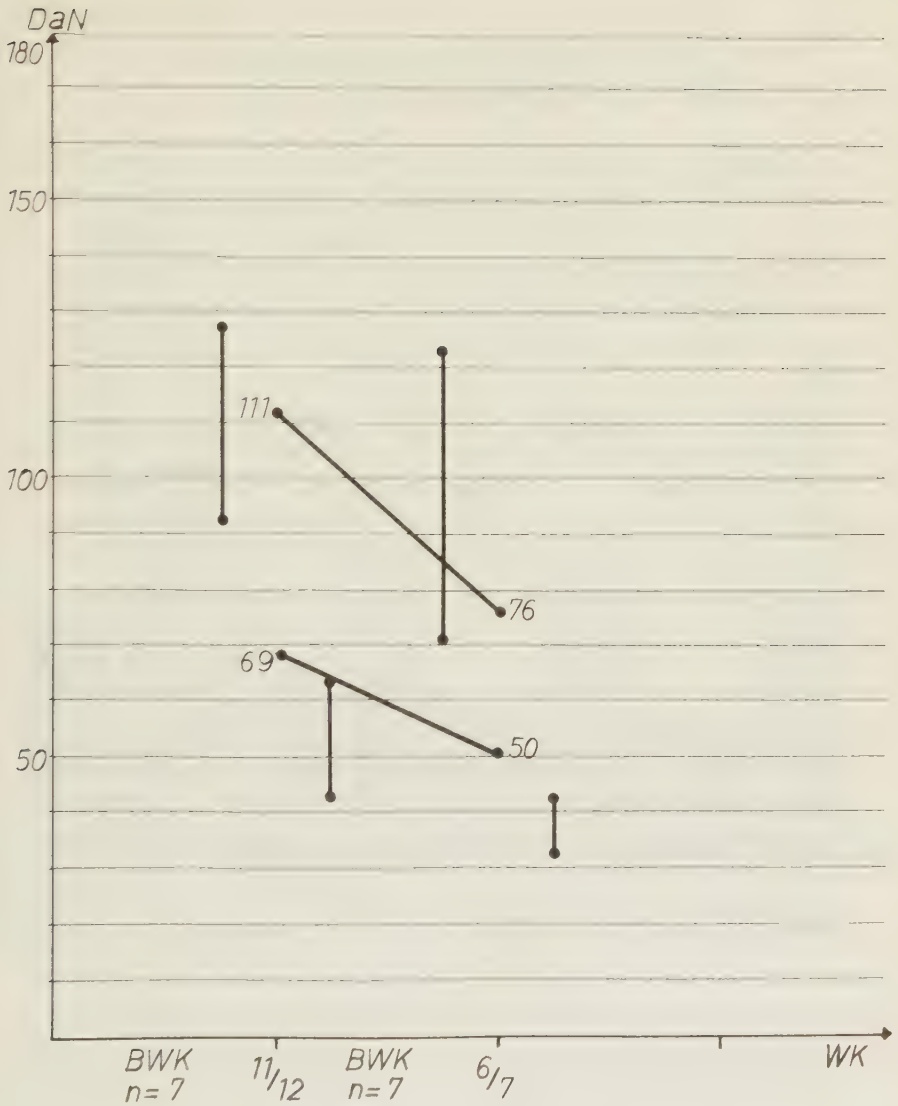


Abb. 23: Durchschnittswerte für maximale und minimale Auszugskraft
Zugrichtung rechtwinklig bei Implantation der Winkelplatte nach Ziele

2.2.1.3 Schraube mit und ohne Winkelplatte

Vergleich an benachbarten Wirbelkörpern

Das Ausmaß der Zunahme der Ausreißfestigkeit der Schraube bei Verwendung einer Winkelplatte zeigen die folgenden Versuche. Sie wurden jeweils an zwei benachbarten Wirbelkörpern derselben Wirbelsäule durchgeführt, um den Vergleich unabhängig von den beobachteten großen interindividuellen Unterschieden in der Wirbelkörper-Belastbarkeit zu ermöglichen.

Die Abb. 24 zeigt am Beispiel von 4 Segmenten bestehend aus zwei benachbarten Wirbelkörpern (Wirbelsäule 31 j. m.) den deutlichen Anstieg von minimaler und maximaler Auszugskraft bei Verwendung einer Winkelplatte (Ausnahme: maximale Auszugskraft Brustwirbelkörper 12/11). Dabei ist zu beachten, daß wir die Winkelplatte immer in den jeweils höheren Wirbelkörper implantierten, der nach den zuvor genannten Ergebnissen eher vermindert belastbar sein müßte (im Mittel minus 5 DaN bei axialem Zug). Die minimale Auszugskraft nimmt von Brustwirbelkörper 12 nach Brustwirbelkörper 11 um 67 %, an Brustwirbelkörper 10/9 um 40 %, an Brustwirbelkörper 8/7 um 103 % und an Brustwirbelkörper 6/5 um 126 % zu, im Mittel um 84 %. Die mittlere Zunahme der maximalen Auszugskraft bei Verwendung einer Winkelplatte beträgt an diesen 4 Segmenten dagegen nur 25 %.

Die Tabellen 3 und 4 geben einen Überblick über alle Ergebnisse, gewonnen an insgesamt 18 Segmenten von zwei benachbarten Wirbelkörpern an 10 verschiedenen Wirbelsäulen. Zu beachten ist wiederum, daß die Implantation der Winkelplatte immer an jeweils höheren, also eher weniger belastbaren Wirbelkörpern erfolgte, die Zunahme der Auszugskraft also absolut ist. Die Tabelle 4 zeigt an 17 von 18 untersuchten Wirbelkörper-Segmenten eine Zunahme der maximalen Auszugskraft bei Verwendung einer Winkelplatte um mindestens 3 %,

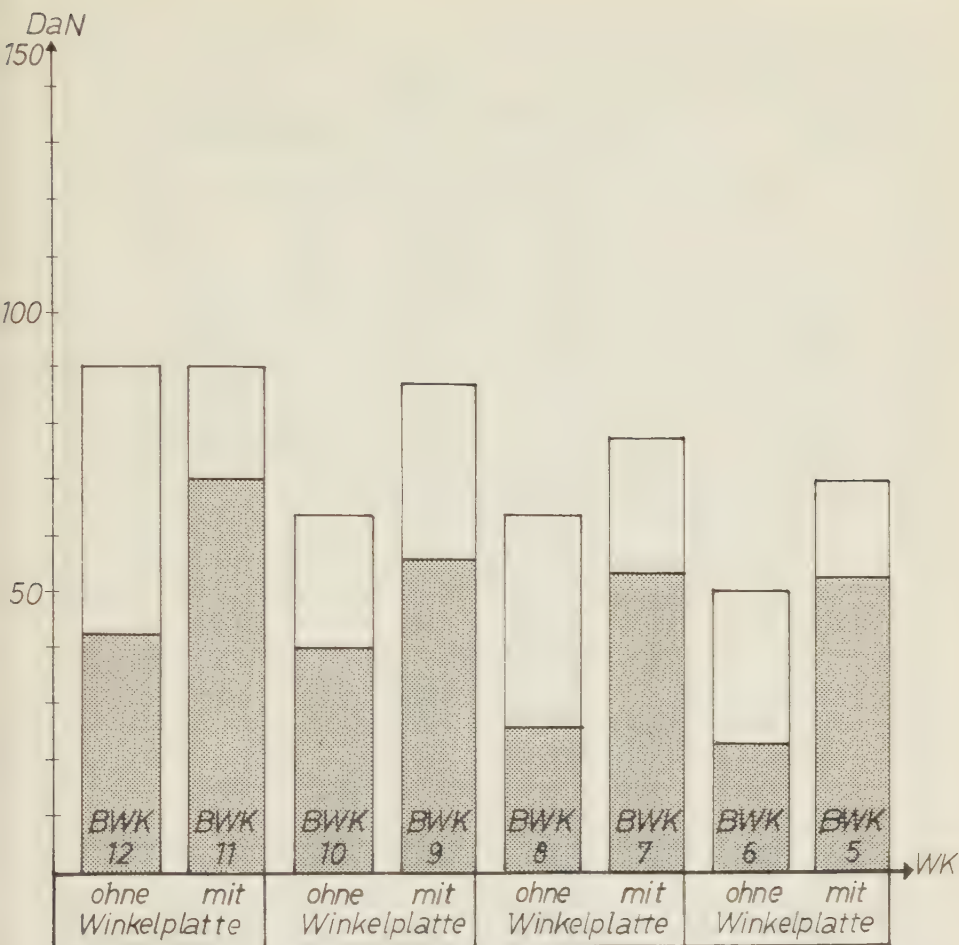


Abb. 24: Maximale und minimale Auszugskraft bei Normalverschraubung mit und ohne Implantation der Winkelplatte nach Zielke

WS - Lfd. Nr. Segmente		Min. Auszugskraft ohne mit Winkelplatte		Zunahme der min. Auszugskraft in %
1	BWK 12 - 11	42	70	67
	BWK 10 - 9	40	56	40
	BWK 8 - 7	26	53	103
	BWK 6 - 5	23	52	126
2	BWK 12 - 11	38	92	142
	BWK 9 - 8	50	58	16
3	BWK 12 - 11	44	82	86
	BWK 8 - 7	40	46	15
4	BWK 11 - 10	22	64	190
	BWK 7 - 6	15	62	313
5	BWK 12 - 11	81	86	6
	BWK 9 - 8	58	83	43
	BWK 6 - 5	54	60	11
6	BWK 10 - 9	19	47	147
7	BWK 7 - 6	24	38	58
8	BWK 9 - 8	20	68	240
9	LWK 4 - 3	90	108	20
10	LWK 4 - 3	73	95	30
Segmente		--	--	--
gesamt n = 18		42	67	92

Tab. 3

WS - Lfd. Nr. Segmente		Max. Auszugskraft ohne mit Winkelplatte		Zunahme der max. Auszugskraft in %
1	BWK 12 - 11	90	90	0
	BWK 10 - 9	64	88	37.5
	BWK 8 - 7	64	78	22.0
	BWK 6 - 5	50	70	40.0
2	BWK 12 - 11	116	128	10.0
	BWK 9 - 8	70	85	21.0
3	BWK 12 - 11	99	112	13.0
	BWK 8 - 7	75	80	7.0
4	BWK 11 - 10	90	118	31.0
	BWK 7 - 6	56	78	39.0
5	BWK 12 - 11	104	138	33.0
	BWK 9 - 8	92	112	22.0
	BWK 6 - 5	90	106	18.0
6	BWK 10 - 9	66	86	30.0
7	BWK 7 - 6	46	48	4.0
8	BWK 9 - 8	54	82	51.0
9	LWK 4 - 3	170	175	3.0
10	LWK 4 - 3	118	131	11.0
Segmente gesamt n = 18		-- 84	-- 104	22

Tab. 4

maximal 51 %, im Mittel muß die Zugkraft um 22 % erhöht werden, um die Schraube vollständig aus dem Wirbelkörper zu reißen. Die Tabelle 3 zeigt an allen 18 Segmenten eine Zunahme der minimalen Auszugskraft bei Verwendung einer Winkelplatte um mindestens 6 %, maximal 313 %, im Durchschnitt um 92 %. Die Ergebnisse sind statistisch hochsignifikant ($\alpha < 0,01$ / Wilcoxon Test für Paardifferenzen). Sie zeigen, daß die Bedeutung der Winkelplatte vor allem in einer erheblichen Zunahme der minimalen Auszugskraft liegt, d.h., mit Winkelplatte konnte an den untersuchten 18 Segmenten durchschnittlich 92 % mehr Kraft in den Wirbelkörper eingeleitet werden, bevor es zur Schraubenlockerung kam. Damit verglichen wird die maximale Auszugskraft wesentlich geringer durch die implantierte Winkelplatte beeinflusst, der komplette Ausriß der einmal in Bewegung geratenen Schraube kann durch eine Winkelplatte nur wenig verzögert und nicht verhindert werden.

2.2.1.4 Schraube mit und ohne umgekehrt implantierte Winkelplatte - Vergleich an benachbarten Wirbelkörpern

In den folgenden Versuchen prüften wir die von Zapfe (25) angeregte Methode, die Winkelplatte entgegengesetzt der Zugrichtung in den Wirbelkörper zu implantieren (vgl. Abb. 8), um eine erhöhte Ausreißfestigkeit der Schraube zu erzielen. Die Tabelle 5 gibt einen Überblick über die Versuche an 9 Segmenten von benachbarten Wirbelkörpern aus 6 verschiedenen Wirbelsäulen. Verglichen werden die erhaltenen Werte für maximale und minimale Auszugskraft mit den Ergebnissen bei Implantation der Schraube allein im jeweils benachbarten Wirbelkörper. Der Zug erfolgte wiederum vertical, im Winkel von 90° zur Schraubenlängsachse (vgl. Abb. 25). Der obere Teil der Tabelle zeigt, daß nur bei 3 der unter-

WS - Lfd. Nr. Segmente		Max. Auszugskraft ohne mit Winkelplatte nach Zapfe DaN		Zunahme der max. Auszugskraft in %
1	BWK 12 - 11	80	71	- 11.2
	BWK 9 - 8	74	90	+ 21.6
	BWK 7 - 6	76	82	+ 7.9
2	LWK 3 - 2	109	95	- 12.8
3	BWK 7 - 6	99	86	- 14.0
4	BWK 6 - 5	70	70	0
5	BWK 5 - 6	90	51	- 43
6	BWK 6 - 7	78	66	- 15.3
	BWK 10 - 11	94	104	+ 10.6
Segmente gesamt n = 8		-- 96.2	-- 89.4	< 0
WS - Lfd. Nr. Segmente		Min. Auszugskraft ohne mit Winkelplatte nach Zapfe DaN		Zunahme der min. Auszugskraft in %
1	BWK 12 - 11	50	46	- 8
	BWK 9 - 8	52	82	+ 57.6
	BWK 7 - 6	36	64	+ 77.7
2	LWK 3 - 2	70	65	- 7.1
3	BWK 7 - 6	40	40	0
4	BWK 6 - 5	30	35	16.6
5	BWK 5 - 6	42	25	- 40
6	BWK 6 - 7	30	30	0
	BWK 10 - 11	55	50	- 9.1
Segmente gesamt n = 8		-- 50.6	-- 54.6	< 0

Tab. 5

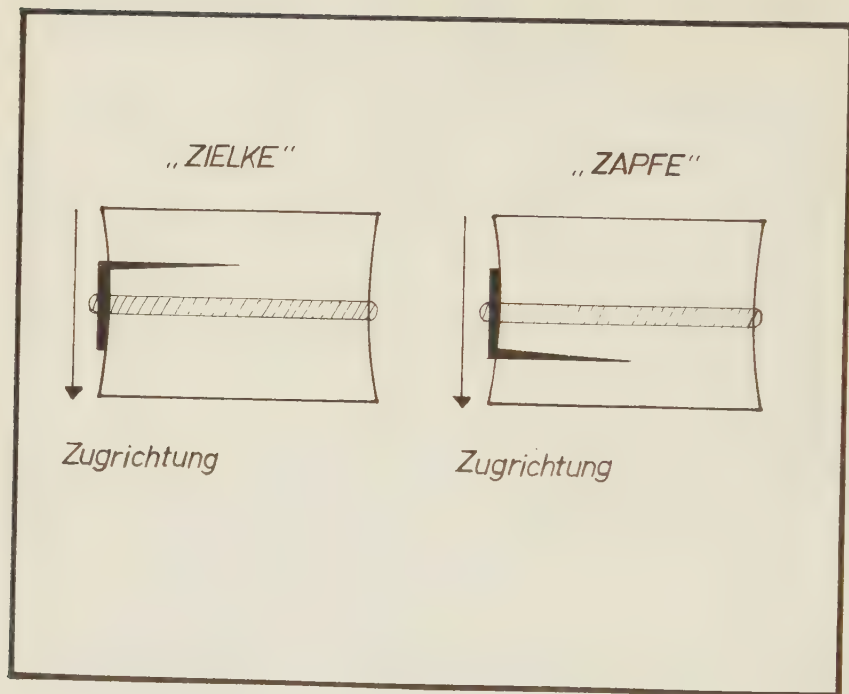


Abb. 25: Implantation der Winkelplatte
in und entgegengesetzt der Zugrichtung
(schem.)

suchten 9 Segmente ein Anstieg der maximalen Auszugskraft bei Implantation der Winkelplatte nach Zapfe zu beobachten war. Der Anstieg betrug mindestens 7,9 %, maximal 21 %. In 4 Fällen kam es zu einer Abnahme der maximalen Auszugskraft zwischen 11,2 und 43 %. In einem Fall blieb die maximale Auszugskraft gleich. Ähnlich erscheinen die Ergebnisse bei der minimalen Auszugskraft. Sie ließ sich nur an zwei Segmenten um 57,6 % bzw. 77,7 % steigern, in 4 Fällen kam es zu einer Abnahme von 7,1 / 40 %. An zwei Segmenten ließen sich keine Veränderungen der minimalen Auszugskraft beobachten.

Insgesamt fanden wir also bei mehr als der Hälfte der untersuchten 9 Segmente eine Abnahme von minimaler und maximaler Auszugskraft, wenn eine Winkelplatte nach Zapfe implantiert worden war. - Das System Winkelplatte nach Zapfe plus Schraube zeigte sich also weniger belastbar als die Schraube allein.

Die Ergebnisse sind statistisch nicht signifikant.

2.2.1.5 Schraube allein - Schraube mit Unterlegscheibe - Schraube mit Winkelplatte Vergleich an benachbarten Wirbelkörpern

Die Abb. 26 zeigt das Ergebnis des Vergleiches der genannten Implantationsmethoden an jeweils drei benachbarten Wirbelkörpern aus drei verschiedenen Wirbelsäulen. An der ersten Wirbelsäule (6 j. w.) kam es mit Unterlegscheibe und Winkelplatte zu einem geringfügigen Anstieg der minimalen Auszugskraft um 2 DaN, die maximale Auszugskraft ließ sich lediglich durch die Winkelplatte um 2 DaN steigern. An der zweiten Wirbelsäule (22 j. m.) ließ sich durch die Winkelplatte eine deutliche Zunahme von maximaler und minimaler Auszugskraft erzielen. Die Unterlegscheibe steigerte die

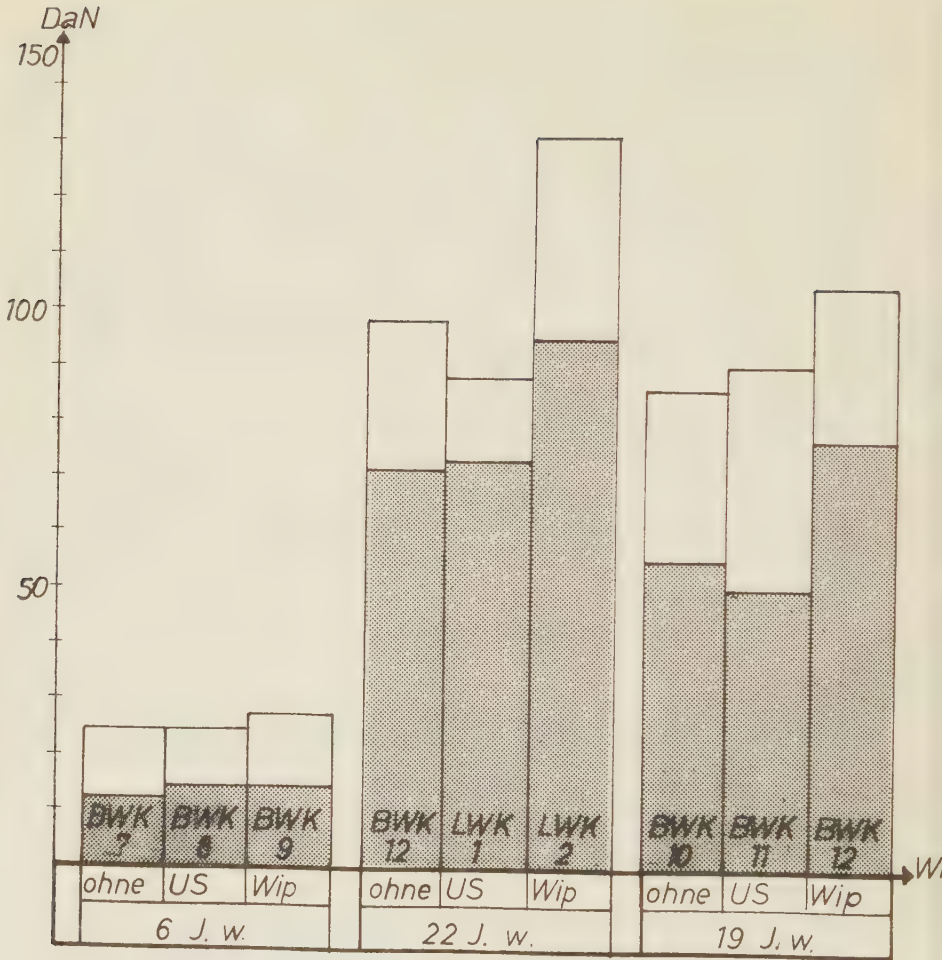


Abb. 26: Vergleich Schraube allein - mit Unterlegscheibe - mit Winkelplatte

minimale Auszugskraft nur um in der Größenordnung nicht relevante 1 DaN, die maximale Auszugskraft nahm in Vergleich zur Schraube allein sogar etwas ab.

Ähnliche Verhältnisse fanden wir an der dritten Wirbelsäule (19 j. w.). Ein deutlicher Anstieg der Auszugskraft wurde nur mit der Winkelplatte erzielt (von 80 auf 104 DaN bzw. von 55 auf 76 DaN). Die minimale Auszugskraft war bei Verwendung einer Unterlegscheibe sogar um 5 DaN geringer, die maximale nahm mit 4 DaN nur geringfügig zu.

Ein der Winkelplatte vergleichbarer Effekt im Sinne einer Zunahme von minimaler und maximaler Auszugskraft ließ sich mit der Unterlegscheibe an den drei untersuchten Wirbelkörper-Gruppen nicht zeigen!

Besonders interessant erscheint das Beispiel der 6-jährigen, weiblichen Wirbelsäule. Wir erzielten hier an Brustwirbelkörper 7 mit der Schraube allein nur Auszugskräfte von 25 bzw. 12 DaN. Diese ließen sich weder bei zusätzlicher Implantation einer Unterlegscheibe noch bei Verwendung einer Winkelplatte signifikant steigern.

2.2.2 Diagonalverschraubung im Wirbelkörper

2.2.2.1 Winkel + 45° zur horizontalen Normalverschraubung

Bei Zug in Richtung der Wirbelsäulen-Längsachse resultiert in dieser Versuchsanordnung ein Zug im Winkel von etwa 135° zur Schraubenlängsachse (vgl. Abb. 12). Die Schraube wird zu gleichen Teilen durch rechtwinkligen und axialen Zug belastet (vgl. Tab. 1).

Die Abb. 27 zeigt den typischen Kurvenverlauf bei Diagonalverschraubung von + 45° in Zugrichtung: Die Kurve steigt rasch und stetig an, um nach einer Plateau-Phase gleichmä-

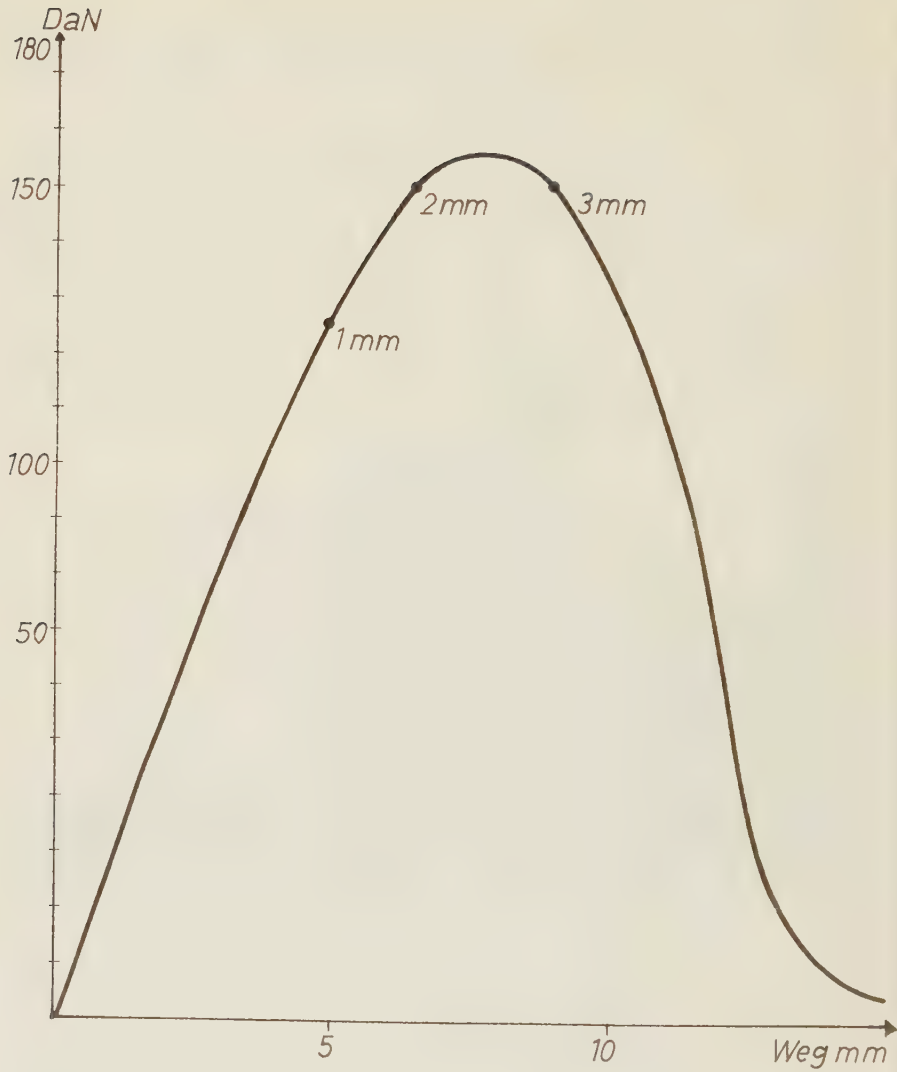


Abb. 27: Typischer Kurvenverlauf
Diagonalverschraubung + 45° in Zugrichtung

Big wieder abzufallen. Das Kurvenbild ähnelt sehr dem bei axialem Zug (vgl. Abb. 15), jedoch erfolgen Anstieg und Abfall etwas weniger steil, die Plateau-Phase ist länger. Von besonderer Bedeutung ist der Zeitpunkt der ersten Schraubenbewegung um einen Millimeter, also der minimalen Auszugskraft, die in diesem Beispiel mit 125 DaN über 80 % der maximalen Auszugskraft von 155 DaN beträgt. Die Verhältnisse gleichen also fast denen bei axialem Zug, wo die Schraube bis zu einem Maximum an einleitbarer Kraft unverrückbar fest sitzt und dann plötzlich ohne nennenswerten Widerstand ausreißt.

Im Vergleich zum Kurvenverlauf bei streng rechtwinkligem Zug (vgl. Abb. 18) imponiert zum einen der stetigere und steilere Kurvenanstieg, zum anderen die deutliche Annäherung der minimalen an die maximale Auszugskraft. Dies gilt auch für den Vergleich mit dem Kurvenbild bei rechtwinkligem Zug unter Verwendung einer Winkelplatte (vgl. Abb. 21). Hier betrug die minimale Auszugskraft im Durchschnitt nur etwa 50 % der maximalen Auszugskraft. Die Diagonalverschraubung von + 45° im Wirbelkörper schafft also mechanische Verhältnisse, die denen bei rein axialem Zug stark angenähert sind - die Schraube nimmt die eingeleitete Kraft schnell und gleichmäßig auf, die erste Bewegung der Schraube erfolgt erst spät, kurz vor dem kompletten Ausriß aus dem Wirbelkörper. Der Quotient minimale Auszugskraft / maximale Auszugskraft ist bei Diagonalverschraubung von + 45° deutlich größer als bei Verwendung einer Winkelplatte und rechtwinkligem Zug, d.h., der Beginn der Lockerung des Implantatsystems ist deutlich in Richtung der maximalen Belastbarkeit des Implantatsystems verschoben.

2.2.2.2 Vergleich von Normalverschraubung und Diagonalverschraubung von + 45° in Zugrichtung

Die Abb. 28 und 29 zeigen das Ergebnis des direkten Vergleiches zwischen den genannten Implantationsmethoden an 10 Gruppen von zwei benachbarten Wirbelkörpern aus insgesamt 4 Wirbelsäulen. Zu bemerken ist, daß wir für die Diagonalverschraubung immer den jeweils höheren, also eher weniger belastbaren Wirbelkörper wählten. Dennoch fanden wir an allen 10 untersuchten Wirbelkörper-Gruppen eine deutliche Erhöhung der Ausreißfestigkeit der Schraube durch die Diagonalverschraubung.

Die maximale Auszugskraft (Abb. 28) ließ sich um minimal 32 DaN, maximal um 75 DaN steigern, dies bedeutet eine Zunahme der Ausreißfestigkeit um 19,2 % bzw. 60 %. Im Durchschnitt betrug die Zunahme der maximalen Auszugskraft 49 %. Die Ergebnisse sind statistisch signifikant ($\alpha < 0,05$ / Wilcoxon-Test für Paardifferenzen).

Die minimale Auszugskraft ließ sich mit Hilfe der Diagonalverschraubung um 18 DaN bis 82 DaN steigern, die Zunahme an den untersuchten 5 Wirbelkörper-Gruppen betrug im Durchschnitt 108 %. Ähnlich wie die Winkelplatte führt die Diagonalverschraubung besonders zu einer deutlichen Zunahme der minimalen Auszugskraft - an den untersuchten Wirbelkörper-Gruppen mußten wir durchschnittlich etwa 100 % mehr Zugkraft aufwenden, um die diagonal im Wirbelkörper eingebrachte Schraube um 1 mm zu bewegen. In diesem Zusammenhang ist bemerkenswert, daß wir mit der Diagonalverschraubung von + 45° auch an der 9-jährigen Wirbelsäule eine Zunahme der minimalen Auszugskraft von 35 auf 53 DaN, d.h. um 51 % erzielen konnten. Auch am höchsten der untersuchten Wirbelkörper-Segmente, an Brustwirbelkörper 8/7 einer 37-jährigen, männlichen Wirbelsäule zeigte sich eine deutliche Zu-

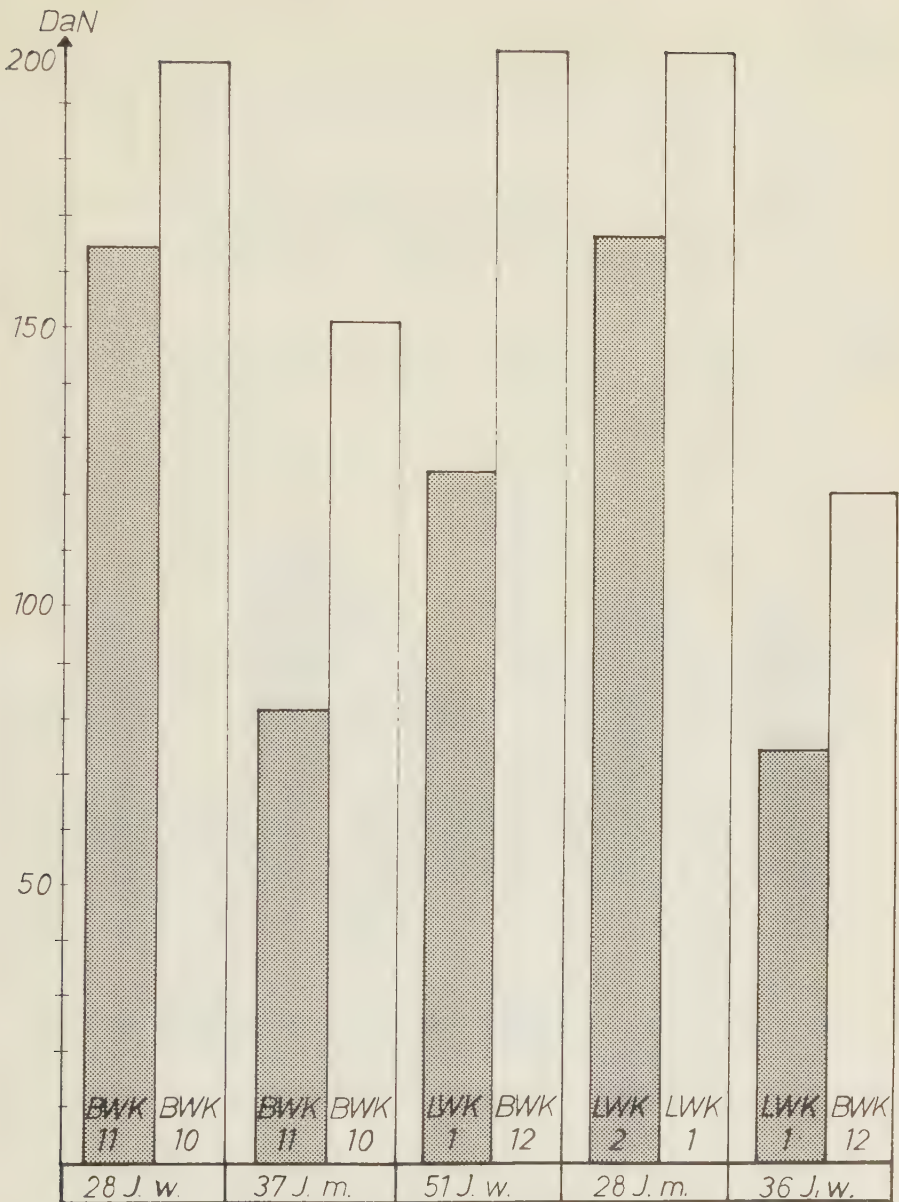


Abb. 28: Maximale Auszugskraft bei normaler und diagonaler Verschraubung im Wirbelkörper

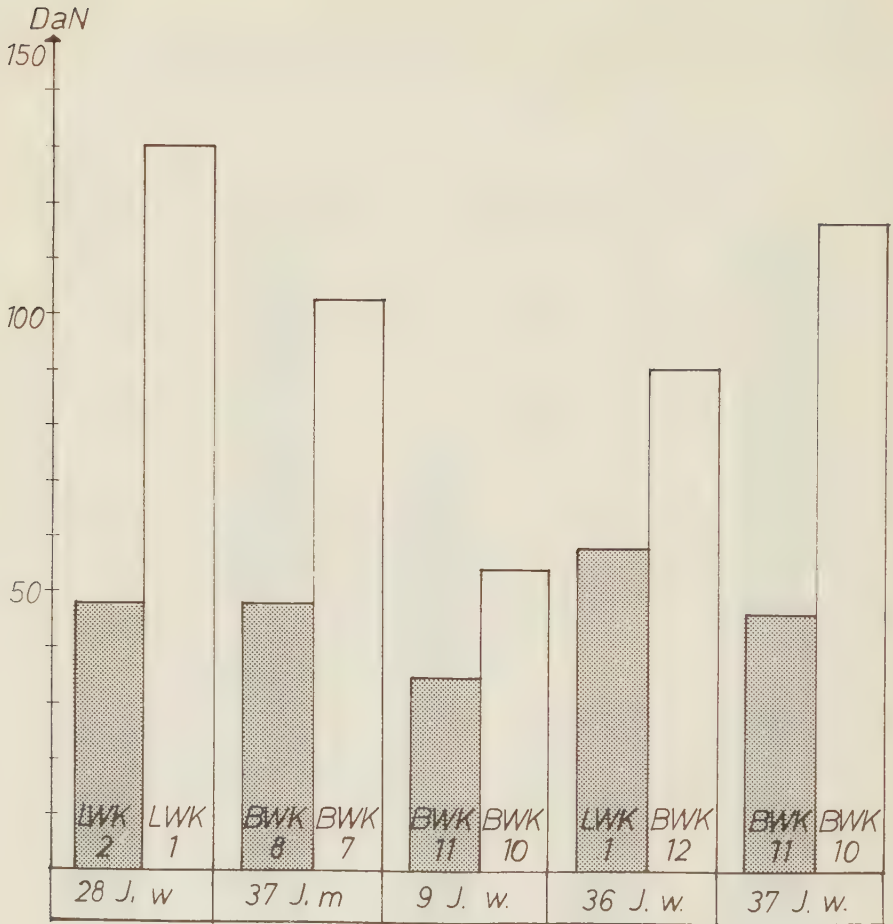


Abb. 29: Minimale Auszugskraft bei normaler und diagonalen Verschraubung im Wirbelkörper

nahme der minimalen Auszugskraft um 112 %.

Die Ergebnisse sind statistisch signifikant ($\alpha < 0,05$ / Wilcoxon-Test für Paardifferenzen).

2.2.2.3 Vergleich Diagonalverschraubung + 45° - Normalverschraubung - Diagonalverschraubung - 45°

Die Abhängigkeit der Ausreißfestigkeit der Schraube vom Implantationswinkel zeigen auch die folgenden Versuche. Während ein Winkel von + 45° zur horizontalen Normalverschraubung zu einer biomechanisch sehr günstigen Belastung der Schraube und zu stark erhöhter Ausreißfestigkeit führt, ist bei Implantation von - 45°, also entgegengesetzt der Zugrichtung, das Gegenteil zu erwarten. Entsprechend den im Kapitel Methodik genannten mathematischen Überlegungen wirkt hierbei die Resultierende aus axialer und horizontaler Zugkraft der angelegten Zugkraft entgegen. Die Ergebnisse bestätigen dies. Wir verglichen die Implantationsmethoden direkt an Gruppen von 3 benachbarten Wirbelkörpern jeweils einer Wirbelsäule (vgl. Abb. 19) (Abb. 30).

Die minimale Auszugskraft war um durchschnittlich 53 % geringer als bei Normalverschraubung. Für die maximale Auszugskraft beträgt die Differenz im Mittel 65 %. Die Ausreißfestigkeit der Schrauben ist also noch geringer als bei Normalverschraubung und streng rechtwinkligem Zug.

Hingegen zeigte sich wiederum die erhebliche Zunahme der Verankerungsfestigkeit der Schraube bei Diagonalverschraubung von + 45° in Zugrichtung. Zum kompletten Ausriß der Schraube (= maximale Auszugskraft) waren im Mittel 55 % mehr Zugkraft erforderlich. Um die Schraube um einen Millimeter zu bewegen (= minimale Auszugskraft), mußten wir an diesen drei Wirbelsäulen durchschnittlich 135 % mehr Zugkraft aufwenden.

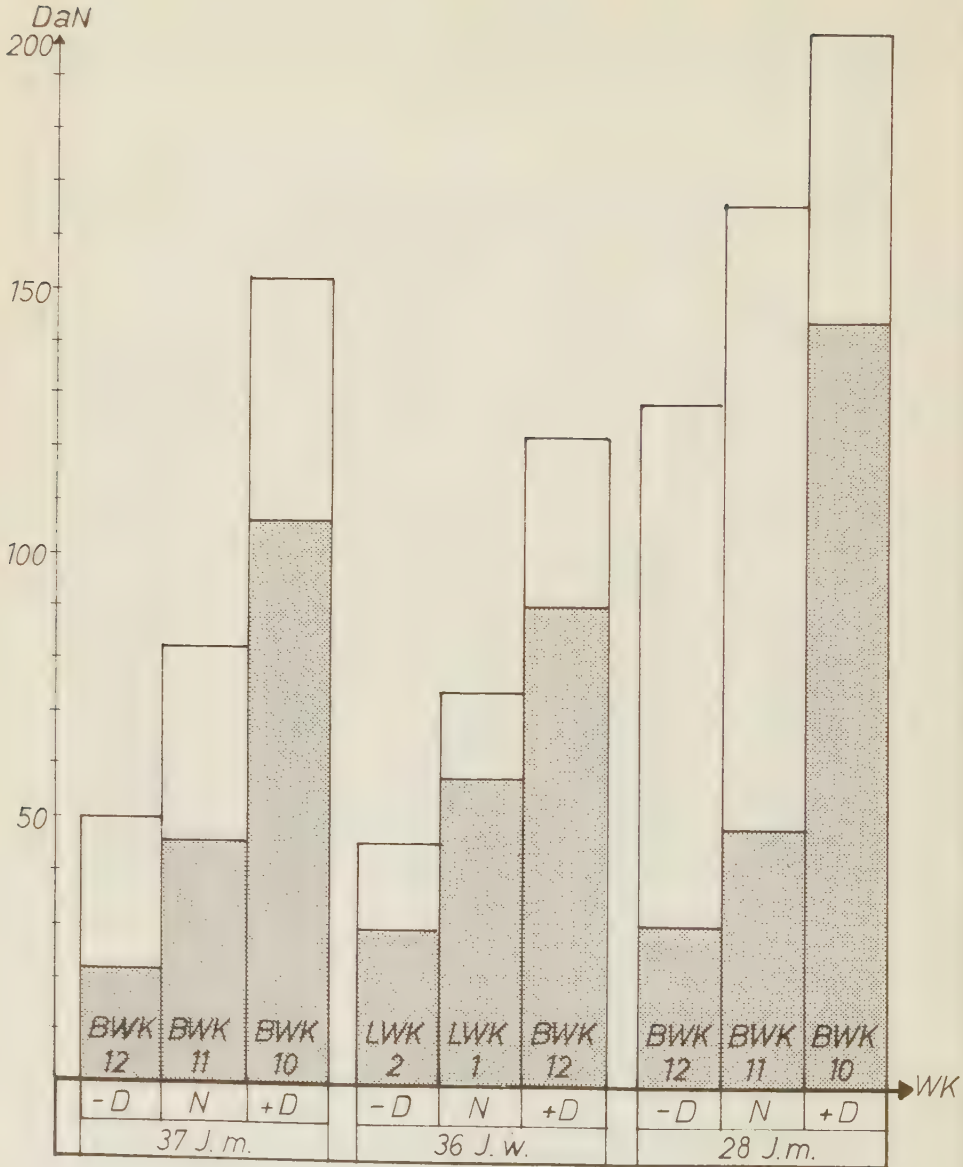


Abb. 30: Maximale und minimale Auszugskraft bei normaler und diagonaler Verschraubung in (+ D) und entgegengesetzt (- D) der Zugrichtung

2.2.2.4 Vergleich Winkelplatte - Diagonalverschraubung + 45° in Zugrichtung

In den folgenden Versuchen verglichen wir die Verankerungsfestigkeit der Schrauben bei Diagonalverschraubung von + 45° mit der bei Normalverschraubung und zusätzlicher Implantation einer Winkelplatte anhand von 12 Gruppen zweier benachbarter Wirbelkörper jeweils einer Wirbelsäule. Wir nahmen Versuche an insgesamt fünf verschiedenen Wirbelsäulen vor. Aus technischen Gründen konnten wir leider nur an drei der fünf Wirbelsäulen die Versuche an direkt benachbarten Wirbelkörpern unternehmen, in den beiden anderen Wirbelsäulen wurde jeweils der übernächste Wirbelkörper instrumentiert. Bezüglich der Methodik ist außerdem zu bemerken, daß bei vier der fünf untersuchten Wirbelsäulen immer für das höhere, also weniger belastbare Segment die Diagonalverschraubung gewählt wurde (Ausnahme Nummer 2). Im Falle der Wirbelsäulen Nr. 3 und 5 (Brustwirbelkörper 6/4 bzw. Brustwirbelkörper 5/3) wurde der zwei Segmente höher liegende Wirbelkörper diagonal verschraubt. An der Wirbelsäule Nr. 2 war dies nicht möglich, wir implantierten hier in Brustwirbelkörper 8 eine Winkelplatte, verschraubten diese normal und brachten in Brustwirbelkörper 10 die Schraube diagonal (+ 45°) ein. Die Tab. 6 zeigt die Ergebnisse.

Die maximale Auszugskraft ließ sich durch Diagonalverschraubung an allen sechs untersuchten Wirbelkörper-Gruppen steigern. Die Zunahme betrug dabei durchschnittlich 20,5 %, wobei der an Wirbelsäule Nr. 2 gewonnene Wert von 57 % absolut nicht mit den anderen vergleichbar ist. Auffallend ist jedoch, daß sich auch an der oberen Brustwirbelsäule (Wirbelsäule Nr. 3 Brustwirbelkörper 6/4 und Nr. 5 Brustwirbelkörper 5/3) die bei Verwendung einer Winkelplatte erzielte maximale Auszugskraft durch Diagonalverschraubung noch stei-

WS - Lfd. Nr. Segmente		Max. Auszugskraft Winkelplatte 45°		Zunahme der max. Auszugskraft in %
1	BWK 12 - 11	128	142	10.9
	BWK 8 - 7	77	102	32.5
2	BWK 8 - 10	42	66	57.0
3	BWK 6 - 4	48	52	8.3
4	BWK 9 - 10	82	88	7.3
5	BWK 5 - 3	95	102	7.3
n = 6		-- 78.6	-- 92	-- 20.5
WS - Lfd. Nr. Segmente		Min. Auszugskraft Winkelplatte 45°		Zunahme der min. Auszugskraft in %
1	BWK 12 - 11	50	66	32
	BWK 8 - 7	45	76	68.8
2	BWK 8 - 10	32	53	65.6
3	BWK 6 - 4	38	50	31.0
4	BWK 9 - 10	68	76	11.7
5	BWK 5 - 3	50	80	60.0
n = 6		-- 47.1	-- 66.8	-- 44.8

Tab. 6

gern läßt, und zwar um 7,3 bzw. 7,7 %. Die an diesen beiden Wirbelsäulen gemessenen Werte gewinnen zunehmend dadurch an Bedeutung, als ja nach den zuvor gewonnenen Erkenntnissen an den jeweils zwei Segmente höherliegenden Wirbelkörpern eine Abnahme der Verankerungsfestigkeit um etwa 10 DaN zu erwarten wäre. Es erfolgte jedoch ein Anstieg der maximalen Auszugskraft um jeweils 7 DaN. Noch deutlicher sind die Verhältnisse bei der minimalen Auszugskraft. Sie ließ sich an allen 6 untersuchten Wirbelkörper-Gruppen um durchschnittlich 44,8 % durch die Diagonalverschraubung steigern. Auch an der oberen Brustwirbelsäule nahm sie um 31 % (Wirbelsäule Nr. 3) bzw. um 60 % (Wirbelsäule Nr. 5) zu.

Ein statistisches Maß läßt sich wegen der unterschiedlichen Stichprobenverteilung nicht anlegen.

2.2.3 Gegenmutter - Vergleich mit anderen Implantationsmethoden

An jeweils drei benachbarten Wirbelkörpern zweier Wirbelsäulen (21 j. m. und 33 j. m.) verglichen wir die Verankerungsfestigkeit einer mit Gegenmutter normal horizontal implantierten Schraube mit anderen Implantationsmethoden. Die Abb. 31 zeigt, daß sich mittels der Gegenmutter die minimale Auszugskraft von Brustwirbelkörper 8 nach Brustwirbelkörper 7 um 10 DaN steigern läßt, d.h., die Schraubenlockerung um 1 mm tritt bei Normalverschraubung mit Gegenmutter später ein als bei Verwendung der Schraube allein. Gleiches gilt für die maximale Auszugskraft, sie ist mit Gegenmutter auch größer als bei Normalverschraubung und axialem Zug; die Differenz beträgt in diesem Fall 9 DaN.

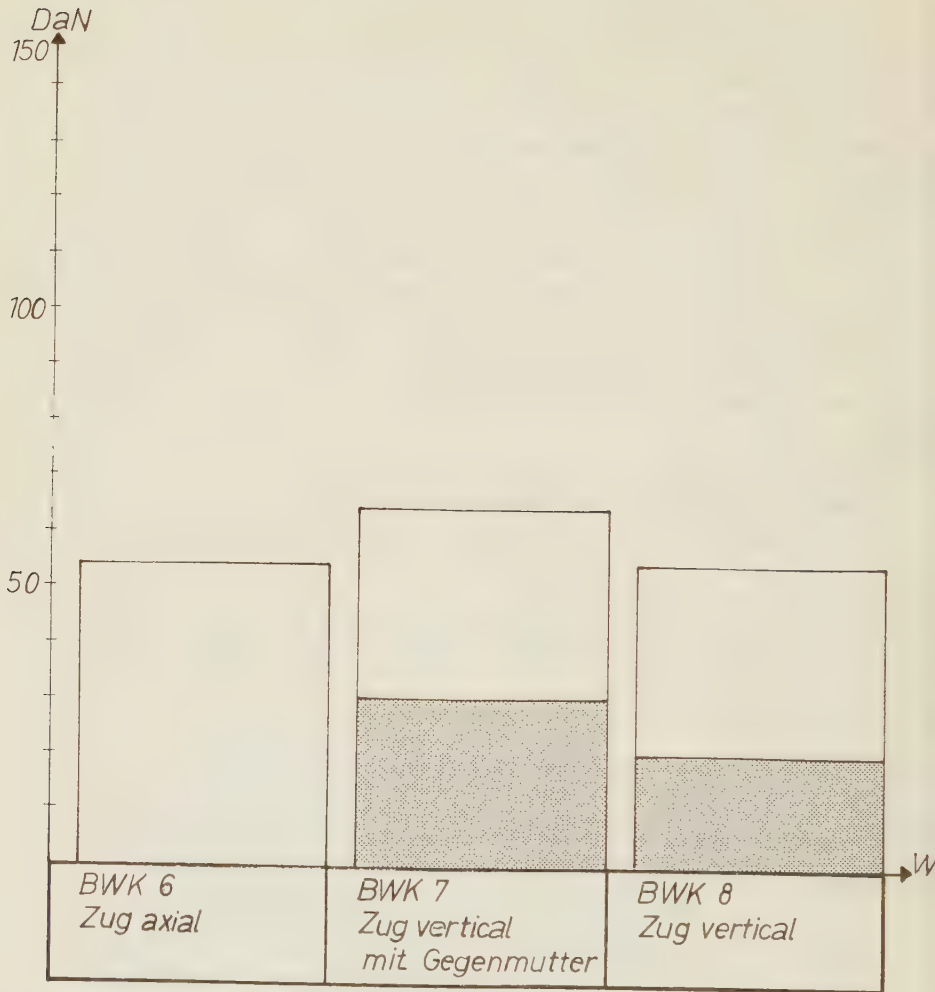


Abb. 31: Maximale und minimale Auszugskraft bei axialem Zug
- verticalem Zug - verticalem Zug mit Gegenmutter

Im direkten Vergleich mit der Diagonalverschraubung (Abb. 32) zeigt sich, daß die minimale Auszugskraft von Brustwirbelkörper 4 (Normalverschraubung mit Gegenmutter) nach Brustwirbelkörper 3 (Diagonalverschraubung von $+ 45^\circ$) um 36 DaN = 80 % steigern läßt - es ist wesentlich mehr Zugkraft erforderlich, um das Implantat um 1 mm zu lockern. Im Vergleich dazu ist der Anstieg der minimalen Auszugskraft um 6 DaN bei Verwendung einer Winkelplatte zu relativieren, da von Brustwirbelkörper 4 nach Brustwirbelkörper 5 ohnehin entsprechend den zuvor gemachten Beobachtungen eine Zunahme der Wirbelkörper-Belastbarkeit um etwa 5 DaN zu erwarten ist.

Im Falle der maximalen Auszugskraft zeigt sich das System Schraube + Gegenmutter sowohl der Diagonalverschraubung als auch dem System Schraube + Winkelplatte überlegen. Wir konnten 22 bzw. 29 DaN mehr Zugkraft in die Schraube einleiten, bevor sie ohne weitere Kraft aufzunehmen völlig aus dem Wirbelkörper ausriß.

Der Beginn der Lockerung der Schraube im Wirbelkörper ist nach diesen Ergebnissen bei Verwendung einer Gegenmutter jedoch deutlich früher zu erwarten als bei Diagonalverschraubung.

Dies ist leicht verständlich, da die Gegenmutter einen totalen Ausriß der Schraube nur bei gleichzeitiger Zerstörung des Wirbelkörpers zuläßt. Für die operative Praxis scheint diese Erhöhung der maximalen Auszugskraft deshalb nicht relevant, weil die Gegenmutter erst nach einer erheblichen Winkelbewegung der Schraube - also bereits erfolgter Implantatlockerung - wirksam werden kann.



Abb. 32: Maximale und minimale Auszugskraft bei Diagonalverschraubung + 45° - Normalverschraubung mit Gegenmutter - Normalverschraubung mit Winkelplatte

DISKUSSION

=====

Das Ziel dieser Untersuchung bestand darin, die Verankerungsfestigkeit und damit die Belastbarkeit des Implantat-systems zur ventralen Derotationsspondylodese nach Zielke zu untersuchen und anhand des zur Verfügung stehenden Instrumentariums Erkenntnisse über die Zugbelastbarkeit von Schrauben im Wirbelkörper zu gewinnen.

Operative Verfahren sind im allgemeinen indiziert bei schweren, progredienten, teilweise mit anderen Wirbelsäulen-Mißbildungen vergesellschafteten Skoliosen. Diejenigen Methoden, die sich zur Korrektur der Krümmung Schrauben oder anderer Implantate bedienen, bergen zusätzlich zu üblichen Operationsrisiken das Risiko von Komplikationen seitens der Implantate - unter Berücksichtigung der zum Teil vitalen Operationsindikationen ein bedeutsamer Aspekt. Dwyer (6) (7) beschreibt wiederholt das Problem des Schraubenausrisse aus dem Wirbelkörper. Zum Ausriß kam es sowohl intraoperativ, beim Anlegen der zur Korrektur erforderlichen Zugkraft, als auch postoperativ. Fast ausnahmslos betroffen davon waren die Schrauben in den beiden oberen Segmenten der Korrekturstrecke. Zielke gibt in seinem Bericht über 58 operierte Fälle (27) insgesamt 14 Schraubenausrisse an, von denen 12 das oberste instrumentierte Segment betrafen.

Mehrere Autoren haben die Belastbarkeit des Dwyer-Instrumentariums (Schraube + Klammer) untersucht: A.F. Dwyer selbst hat die während der Korrektur auf die Schraube einwirkende Zugkraft intraoperativ am menschlichen Wirbelkörper (6) gemessen. A.P. Dwyer tat dies in der Folge experimentell am Hund (9). Dabei waren an einzelnen Segmenten mehr als 50

DaN (obere Grenze seiner Meßmethode) zur Aufrichtung der Krümmung erforderlich. An der oberen Brustwirbelsäule kam es bereits bei einer Zugkraft von 15 - 20 DaN zum Schraubenausriß, während an der unteren Brustwirbelsäule und an der Lendenwirbelsäule auch bei Einleitung von 50 DaN und mehr keine sichtbare Schraubenlockerung festzustellen war.

Michel (20) fand eine durchschnittliche Belastbarkeit der Wirbelkörper von 24 DaN, wobei er zeigen konnte, daß die Ausreißfestigkeit von cranial nach caudal zunimmt. Dunn und Bolstad (5) untersuchten Leichen-Wirbelkörper von unterschiedlichem Osteoporosegrad und fanden diese im Mittel mit nur 29 DaN belastbar. Bemerkenswert ist, daß in zwei Versuchen an nichtosteoporotischen oder degenerativ veränderten Wirbelkörpern mit der verfügbaren Zugkraft von 85 DaN (Maximum der Methode) die in diesem Fall allein - also ohne Klammer implantierten Dwyer-Schrauben - nicht gelockert oder ausgerissen werden konnten.

Der Vergleich mit unseren Ergebnissen zeigt einige Parallelitäten, ein statistisch verwertbarer Vergleich von absoluten Zahlenwerten ist jedoch nicht möglich. Die Ursache dafür liegt zum einen in der unterschiedlichen Beschaffenheit der Instrumentarien: Die Schrauben und Klammern nach Dwyer entsprechen nicht denen des Zielke-Instrumentariums. Zum anderen machte Dwyer seine Untersuchungen in vivo am intakten Wirbelkörper. Außerdem wiesen unsere Präparate im Vergleich zu den von Michel untersuchten Wirbelkörpern zumindest röntgenologisch keine Osteoporose auf.

Ein besonderes Problem stellen die zum Teil beträchtlichen interindividuellen Unterschiede in der Wirbelkörper-Belastbarkeit dar, die wir bei unseren Versuchen beobachten konnten. Die von Präparat zu Präparat in einigen Fällen stark differierenden Meßergebnisse ließen sich weder mit dem Al-

ter noch mit dem Geschlecht der untersuchten Wirbelsäulen korrelieren. Die Differenzen betrugen teilweise bis zu 100 %. So waren z.B. an drei gleichaltrigen, 21-jährigen männlichen Wirbelsäulen an Brustwirbelkörper 8 54 bzw. 80 bzw. 104 DaN erforderlich, um die horizontal im Wirbelkörper implantierte Schraube mit verticalem Zug zum vollständigen Ausriß zu bringen. Die an diesen drei Präparaten gemessenen minimalen Auszugskräfte unterstützen diese Beobachtung und zeigen entsprechende Differenzen (20 bzw. 52 bzw. 80 DaN).

Ergebnisse anderer Untersuchungen an anderen menschlichen Knochen zeigen ebenfalls diese Problematik. Hütter (19) prüfte in Untersuchungen über biomechanische Eigenschaften der 4,5 mm AO Corticalisschraube deren Haltekraft in Abhängigkeit von der Corticalisdicke des untersuchten Röhrenknochens. Er unternahm insgesamt 800 Messungen an 160 frischen Leichenknochen von 52 Individuen mit einer Altersbreite von 12 - 85 Jahren: "Die relativ niedrigen Korrelationskoeffizienten (zwischen Haltekraft und Corticalisdicke) lassen darauf schließen, daß andere Faktoren wie Konstitution und Allgemeinzustand die Materialeigenschaften des corticalen Knochens ebenfalls beeinflussen und somit zu den Streuungen beitragen." Ansell (2) konnte ebenfalls "große Abweichungen in den mechanischen Eigenschaften von menschlichen Knochen" zeigen. In seiner "Study of some factors which affect the strength of screws" wurden die zum Auszug einer selbstschneidenden 4 mm-Schraube aus der Femur-Corticalis erforderlichen Kräfte gemessen. Dazu waren unter gleichen Versuchsbedingungen Kräfte von 123 bis zu 806 DaN notwendig, dies bedeutet eine Differenz von mehr als 600 %!

Wir haben ähnliche Erfahrungen auch an unserem Untersuchungsgut gemacht und verzichteten deshalb auf Vergleiche zwischen

Absolut-Werten. Ein Vergleich der Meßergebnisse an jeweils einem Individuum bzw. Wirbelsäulen-Präparat ist jedoch möglich, hierbei sind wir zu Ergebnissen gekommen, die in wesentlichen Punkten Parallelen zu Voruntersuchungen mit dem Dwyer-Instrumentarium zeigen.

Erstens: Die Belastbarkeit der Wirbelkörper nimmt von caudal nach cranial deutlich ab. Wir konnten zeigen, daß die mittlere Lendenwirbelsäule (Lendenwirbelkörper 3/4) im Durchschnitt auf 136 DaN axialen Zug belastbar ist, an der mittleren Brustwirbelsäule (Brustwirbelkörper 6/7) jedoch schon im Mittel ein axialer Zug von 46 DaN zum vollständigen Ausriß der Schraube aus dem Wirbelkörper führt; dies bedeutet eine Abnahme der Belastbarkeit um etwa 70 %. Bestätigt wurde diese Beobachtung durch die Ergebnisse unserer Versuche mit verticalem Zug. Maximale bzw. minimale Auszugskraft betrugen an der mittleren Brustwirbelsäule nur noch 47,5 % bzw. 44,5 % der Auszugskraft an der mittleren Lendenwirbelsäule. Unsere Ergebnisse korrelieren damit sowohl mit den oben genannten Beobachtungen Dwyers als auch mit den Untersuchungen Michels, der bei perpendiculärem = verticalem Zug Lendenwirbelkörper 2 mit durchschnittlich 28 DaN, Brustwirbelkörper 10 hingegen nur mit 18 DaN belastbar fand; dies entspricht einer Abnahme der Auszugskraft von caudal nach cranial um etwa 64 %.

Zweitens: In den Versuchen mit axialem Zug konnten wir die Abhängigkeit der Haltekraft der Zielkeschraube von der Wirbelkörper-Corticalis zeigen; an Lendenwirbelkörper 3/4 betrug die durchschnittliche maximale Auszugskraft (= beide Corticales gefaßt) 136 DaN, an Brustwirbelkörper 6/7 46 DaN. Bei nur einer gefaßten Corticalis, die Schraube wurde wie oben beschrieben genau um den Corticalis-Durchmesser zurückgedreht, so daß die erfaßte Spongiosa-Fläche gleich groß blieb, reduzierten sich die Auszugskräfte auf

67 DaN an Lendenwirbelkörper 3/4 und 26 DaN an Brustwirbelkörper 6/7.

Eine zu kurze, die hintere Wirbelkörper-Corticalis nicht erfassende Schraube ist also um etwa 50 % weniger belastbar!

Wir haben somit mit dem Zielke-Instrumentarium Erfahrungen gemacht, die auch vergleichbar sind mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen, die mit Corticalis-Schrauben aus dem AO-Instrumentarium vorgenommen wurden. So geben Diehl et al. (4) an, daß im Bereich der Tibia beim Einschneiden des Gewindes in beide Corticales maximale Vorspannkkräfte von 250 DaN erzeugt werden können, beim Einschneiden des Gewindes in nur eine Corticalis dagegen nur die halbe Vorspannkraft resultiert. Hütter (19) fand an Femur, Tibia und Humerus lineare Zusammenhänge zwischen Haltekraft der Schrauben und Corticalisdicke, sowie einen kontinuierlichen Rückgang des Quotienten Haltekraft pro Millimeter reduzierte Corticalisdicke bei zunehmendem Lebensalter.

Drittens: Wir konnten nachweisen, daß die zusätzliche Implantation der von Zielke angegebenen Winkelplatte die Auszugskraft an den Schrauben bei verticalem Zug deutlich steigert. An insgesamt 18 untersuchten Segmenten fand sich eine statistisch hochsignifikante ($\alpha < 0,01$) Zunahme der maximalen Auszugskraft bei Verwendung einer Winkelplatte um durchschnittlich 22 %. Dunn und Bolstad (5) untersuchten 10 Wirbelkörper von sehr unterschiedlichem Osteoporosegrad und benötigten bei Verwendung der Dwyer-Schraube allein im Mittel 18 DaN zum Auszug. Durch Verwendung der Dwyer-Klammer ließ sich die Auszugskraft auf durchschnittlich 29 DaN steigern, dies bedeutet eine Zunahme um etwa 60 %. Absolut sind die Ergebnisse jedoch nicht vergleichbar, da erstens die von Dunn und Bolstad untersuchten Wirbelkörper definiert einen sehr unterschiedlichen Gehalt an Knochensubstanz aufwiesen und die Autoren zweitens keine

benachbarten Wirbelkörper verwendeten, so daß keine vergleichbaren Stichprobenpaare vorliegen. Ihre Beobachtungen entsprechen jedoch tendenziell den unseren.

Von besonderem Interesse war das Verhalten der minimalen Auszugskraft bei Implantation einer Winkelplatte: Durchschnittlich 92 % mehr vertikale Zugkraft waren erforderlich, um die Schraube um 1 mm im Wirbelkörper zu bewegen! Wir glauben, daß schon minimale Lockerungen der Schraube im Wirbelkörper zur Instabilität des Implantatsystems führen und damit zu einem postoperativen Korrekturverlust beitragen können. Das Verhalten der minimalen Auszugskraft in Abhängigkeit von verschiedenen Implantationsmethoden erscheint uns deshalb vordergründig interessant. Die Zunahme der minimalen Auszugskraft bei Verwendung einer Winkelplatte war ebenfalls statistisch hochsignifikant ($\alpha < 0,01$), jedoch imponierten auch in diesen Versuchen die großen Streubreiten der Ergebnisse. Auffällig erscheint, daß die minimale Auszugskraft offensichtlich erheblich stärker durch die Winkelplatte beeinflusst wird, während der komplette Schraubenausriß nur gering durch eine Winkelplatte beeinflussbar zu sein scheint.

Mit der entgegengesetzt der Zugrichtung implantierten Winkelplatte, wie von Zapfe (25) vorgeschlagen, konnten wir entsprechende Ergebnisse nicht erzielen. Die Belastbarkeit der Schraube ließ sich nur an zwei bzw. drei von insgesamt acht untersuchten Segmenten aus sechs verschiedenen Wirbelsäulen durch die in dieser Form implantierte Winkelplatte steigern, in über der Hälfte der Fälle war die erforderliche minimale oder maximale Auszugskraft sogar geringer als bei Verwendung der Schraube allein. Wir fanden somit keine proportionalen Beziehungen zwischen Haltekraft der Schraube und Beeinflussung der Haltekraft durch die Winkelplatte nach Zapfe - unter Berücksichtigung der Tatsache, daß gleiche Versuchsbedingungen vorlagen, erscheint

uns dieses Implantatsystem biomechanisch ungünstiger. Eine Ursache für die teilweise sogar herabgesetzte maximale und minimale Auszugskraft ließ sich während des Versuches ablaufes nicht erkennen. Möglicherweise stützt sich der Schraubenkopf am Plattenrand ab und wird durch die ausreißende Platte beschleunigt herausgehoben. Beobachten konnten wir einen solchen Vorgang während des Versuches jedoch nicht. Der Schraubenkopf lag wie in allen anderen Versuchen bündig der Konkavität der Winkelplatte an. Auffällig ist jedoch, daß bei Verwendung der Winkelplatte nach der Zielke-Methode es in keinem der unternommenen Versuche zu einer Minderung der maximalen oder minimalen Auszugskraft kam und wir den stabilisierenden Effekt der Platte im direkten Vergleich an allen untersuchten Wirbelkörper-Gruppen zeigen konnten. Im Vergleich dazu erscheint uns die entgegengesetzt der Zugrichtung im Wirbelkörper implantierte Platte nicht geeignet, den Schraubenhalt zu erhöhen.

Auch mit den Unterlegscheiben gelang es uns nicht, die Haltekraft der Schrauben im Wirbelkörper signifikant zu steigern. Die Versuche zeigten keine deutliche Zunahme von minimaler oder maximaler Auszugskraft bei Verwendung einer Unterlegscheibe, in allen drei untersuchten Gruppen von drei benachbarten Wirbelkörpern ließ sich jedoch mit Hilfe der Winkelplatte eine Zunahme sowohl von minimaler als auch von maximaler Auszugskraft erzielen. Im Falle der 6-jährigen, weiblichen Wirbelsäule, des jüngsten untersuchten Wirbelkörper-Präparates, blieb jedoch auch diese Zunahme gering. Hier handelt es sich jedoch um eine Einzelbeobachtung, da nur ein Wirbelsäulenpräparat dieser Altersgruppe zur Verfügung stand. Angesichts der Beobachtung, daß an der mittleren Brustwirbelsäule der untersuchten 6-jährigen Wirbelsäule eine wesentliche Zunahme der Auszugsfestigkeit der Schraube weder mit Unterlegscheibe noch mit Winkelplatte zu erzielen war, erscheint der Nutzen eines zusätzli-

chen Implantates bei sehr jungen Wirbelsäulen zumindest fragwürdig.

Unter anderem diese Überlegung lag unserem Bemühen zugrunde, mit Hilfe einer einfachen Änderung der von Zielke angegebenen Implantationstechnik ohne zusätzliche Verwendung eines Implantates die Auszugsfestigkeit der Schraube zu erhöhen. Möglich erschien uns dies nur dadurch, die in den Wirbelkörper eingebrachte Schraube vermehrt durch axialen Zug zu belasten und somit ihrer Mechanik besser Rechnung zu tragen. Analog den zugrunde liegenden mathematischen Überlegungen realisierten wir dies durch die Diagonalverschraubung. Das in diesen Versuchen erhaltene Kurvenbild zeigt die Relevanz unserer Überlegungen, die Versuchskurve bei Diagonalverschraubung von $+ 45^\circ$ in Zugrichtung ist der bei streng axialem Zug erhaltenen Kurve stark genähert. Die statistisch signifikanten Ergebnisse belegen die mechanisch günstige Belastung der Schraube bei Diagonalverschraubung in Zugrichtung: maximale und minimale Auszugskraft ließen sich im Vergleich zur Normalverschraubung ohne Winkelplatte um durchschnittlich 49 % bzw. 108 % steigern. Dies gilt auch für das untersuchte 9-jährige Wirbelsäulen-Präparat, wo wir an Brustwirbelkörper 11/10 mit der Diagonalverschraubung eine beachtliche Zunahme der minimalen Auszugskraft um 51 % erzielen konnten. Den negativen Beweis zu führen erlauben die Ergebnisse der Versuche, in denen im direkten Vergleich die Auszugskräfte bei Normalverschraubung und Diagonalverschraubung in und entgegengesetzt der Zugrichtung gemessen wurden: Die Ausreißfestigkeit war bei Diagonalverschraubung von $- 45^\circ$ um durchschnittlich 60 % geringer als bei Normalverschraubung. Für die mechanisch günstige Situation bei Diagonalverschraubung in Zugrichtung sprechen außerdem die folgenden Ergebnisse: Im direkten Vergleich ließen sich mit dieser Implantationsmethode die bei Verwendung einer Winkelplatte erforderlichen Auszugskräfte noch einmal um durchschnittlich 20 %

(maximale Auszugskraft) bzw. 44 % (minimale Auszugskraft) steigern! Dies gilt auch für die besonders problematischen hohen Wirbelsäulen-Segmente: An Brustwirbelkörper 3 war bei diagonalen Verschraubung die minimale Auszugskraft mit 80 DaN um 30 DaN höher als an Brustwirbelkörper 5 bei Normalverschraubung + Winkelplatte. Für dieses Beispiel bedeutet dies eine Zunahme der Ausreißfestigkeit um 60 %. Von Brustwirbelkörper 6 nach Brustwirbelkörper 4 einer anderen Wirbelsäule konnten wir mittels Diagonalverschraubung immerhin eine Zunahme der minimalen Auszugskraft um 31 % erzielen.

Überdies erscheint es uns bedeutsam, daß der Quotient minimale Auszugskraft/maximale Auszugskraft bei Diagonalverschraubung deutlich größer ist als bei Normalverschraubung + Winkelplatte. Die zur Minimallockerung der Schraube im Wirbelkörper erforderliche Zugkraft beträgt dabei 80 % der überhaupt über die Schraube in den Wirbelkörper einleitbaren Kraft, bei Verwendung der Winkelplatte beträgt dieser Wert im Mittel nur 50 %.

Auch bei Anwendung einer Schraube mit Gegenmutter konnten wir kein vergleichbar gutes Ergebnis erzielen; die Gründe dafür sind naheliegend. Mechanisch voll wirksam kann die an der Wirbelkörper-Rückfläche gegengeschaubte Mutter nur bei streng axialem Zug werden, dieser ist annähernd = 0 bei Normalverschraubung und Zug im rechten Winkel zur Schraubenlängsachse, wie er intraoperativ zur Korrektur der Deformität angelegt wird. Auch Zielke (28) und zuvor Hall (13) versuchten dem Problem des am obersten Segment häufig beobachteten Schraubenausrisses mit Hilfe einer Gegenmutter zu begegnen in der Annahme, daß die Schraube im obersten Segment vermehrt durch axiale Zugkräfte belastet wird. Aufgrund der vorstehenden mathematischen Überlegungen erscheint uns diese Annahme eher unwahrscheinlich - vielmehr dürfte der gerade am obersten Segment gehäuft auftretende Schraubenausriß auf die generell deutlich ver-

minderte biomechanische Belastbarkeit der mittleren und oberen Brustwirbelsäule zurückzuführen sein, wie wir in unseren Versuchen zeigen konnten.

Der direkte Vergleich an drei benachbarten Wirbelkörpern zeigt zwar, daß mit der Gegenmutter eine Erhöhung von maximaler und minimaler Auszugskraft gegenüber der normal und ohne Winkelplatte implantierten Schraube möglich ist, der Wert bei axialem Zug, wo es ja ohne eine meßbare vorherige Lockerung zum plötzlichen Schraubenausriß kommt (minimale = maximale Auszugskraft), wird jedoch nicht erreicht. In den Versuchen an einer anderen Wirbelsäule zeigt sich das System Schraube + Gegenmutter dann auch dem System Schraube + Winkelplatte und der Diagonalverschraubung unterlegen. Die maximale Auszugskraft ist mit Gegenmutter zwar größer, d.h., der komplette Ausriß der Schraube erfolgt später, die Minimallockerung der Schraube im Wirbelkörper erfolgt jedoch früher als bei Verwendung einer Winkelplatte. Die Diagonalverschraubung von + 45° steigert die minimale Auszugskraft im Vergleich zum System Schraube + Gegenmutter um fast 50 %! Für die Praxis ist ein positiver Effekt nur dann von einer Gegenmutter zu erwarten, wenn sie bei Diagonalverschraubung von + 45° angewendet wird.

Nach den genannten Ergebnissen erscheint es uns also prinzipiell möglich, Ausreißfestigkeit und Belastbarkeit der Schraube im Wirbelkörper ohne Zuhilfenahme weiterer Implantate zu steigern. Die an unserem Untersuchungsgut gewonnenen Erkenntnisse zeigen, daß mit der Diagonalverschraubung in Richtung der auf die Schraube wirkenden Korrekturkraft Ergebnisse erzielt werden können, die den bisher üblichen Verfahrensweisen mit rechtwinkliger Implantation der Schraube und Verwendung einer stabilisierenden Winkelplatte überlegen sind. Dies gilt ganz besonders für die schwäch-

ste Stelle des Implantatsystems, die Schraube im obersten Segment der Korrekturstrecke. Der direkte Vergleich zwischen beiden Methoden läßt die Tendenz erkennen, daß insbesondere die minimale Auszugskraft durch die Diagonalverschraubung noch deutlich gesteigert werden kann, d.h., daß die vermutlich ebenfalls zur Instabilität des gesamten Implantatsystems beitragenden Minimallockerungen der Schraube im Wirbelkörper erst bei höheren Korrekturkräften auftreten. Das Ausmaß der postoperativ trotz Ruhigstellung im Gips auftretenden Korrekturverluste (27) (28) (8) könnte damit möglicherweise verringert werden. Sollte sich die Diagonalverschraubung als operationstechnisch praktikabel erweisen, erscheint sie uns schon deshalb weiterer Untersuchungen und Diskussionen würdig, da in diesem Falle die technisch aufwendige Implantation der Winkelplatten wegfielen und damit die Operationszeit und das allgemeine Operationsrisiko vermindert werden könnten. Es wird Aufgabe weiterer Untersuchungsreihen sein, zu den genannten Problematiken und Möglichkeiten spezielle Stellung zu nehmen.

ZUSAMMENFASSUNG

=====

An 34 menschlichen Wirbelsäulenpräparaten wurden Versuche zur Ausreißfestigkeit von Schrauben aus dem Instrumentarium zur Ventralen Derotationsspondylodese nach Zielke vorgenommen.

Es zeigt sich eine deutliche Zunahme der Wirbelkörperbelastbarkeit von cranial nach caudal.

Die Implantation der Schraube in nur eine Corticalis setzt ihre Ausreißfestigkeit um etwa 45 % herab.

Es bestehen erhebliche interindividuelle Unterschiede in der Wirbelkörperbelastbarkeit, die Korrelation dieser Unterschiede mit dem Lebensalter ist schlecht.

Die Ausreißfestigkeit der Schrauben läßt sich durch die zusätzliche Implantation einer Winkelplatte steigern.

Die diagonale Implantation der Schraube in den Wirbelkörper erhöht im Vergleich zur Normalverschraubung die zur Minimalbewegung erforderliche Zugkraft signifikant.

Mit der Diagonalverschraubung wird in vitro eine Möglichkeit aufgezeigt, die Belastbarkeit des Implantatsystems nach Zielke ohne die Verwendung von Winkelplatten zu erhöhen.

LITERATURVERZEICHNIS

=====

1. Albee, F.H.: The Albee Spine Fusion Operation in Treatment of Scoliosis
Surg. Gynec. Obstet. 66, 797 (1938)
2. Ansell, R.H., Scales, J.T.: A study of some factors which affect the strength of screws and their insertion and holding power in bone
J. Biomechanics, Vol. 1, pp., 279 (1968)
3. Codivilla, A.: Sulla scoliosi congenita
Arch. Di Orthop. 18, 65 (1901)
4. Diehl, K., Hauser, U., Hort, W., Mittelmeier, H.:
Biomechanische Untersuchungen über die maximalen Vorspannkräfte der Knochenschrauben in verschiedenen Knochenabschnitten
Arch. Orthop. Unf. Chir. 80, 89 (1974)
5. Dunn, H.K., Bolstad, K.E.: Fixation of Dwyer screws for the treatment of Scoliosis
J. Bone Jt. Surg. 59-A, 54 (1977)
6. Dwyer, A.F.: An anterior approach in Scoliosis
Clin. Orthop. 62, 192 (1969)
7. Dwyer, A.F.: Anterior instrumentation for Scoliosis
Israel J. of Med. Sciences 9, 805 (1973)
8. Dwyer, A.F., Schäfer, M.F.: Anterior Approach to Scoliosis, results of treatment in fifty-one cases
J. Bone Surg. 50-B, 218 (1974)
9. Dwyer, A.P.: Telemetric monitoring of cable tension following Dwyer spinal instrumentation
Scoliosis Research Society, 11th Annual Meeting, Ottawa (1976)

10. Galen: "De moto Maeculorum"
Zit. nach Moe, J.H.: Scoliosis and other spinal
deformities
W.B. Saunders Company (1978)
11. Griss: mündliche Mitteilung
12. Guerin, J.: Remarques preliminaires sur le traitement
des Deviationes l'epine par la section des muscles
du dos
Gaz. Med. de Paris 10, 1 (1842)
13. Hall, J.F.: The anterior approach to spinal deformities
Orthop. Clin. of North America 3, 81 (1972)
14. Harrington, P.R.: Treatment of Scoliosis. Correction
and internal fixation by spine instrumentation
J. Bone Jt. Surg. 44-A, 591 (1962)
15. Henle, A.: Versteifung der Wirbelsäule durch Knochen-
transplantation
Verh. dtsch. Ges. Chir. 54, 1169 (1924)
16. Hibbs, R.A.: An operation for progressive spinal
deformities
N.Y. Med. J. 93, 1013 (1911)
17. Hibbs, R.A., Risser, J.C., Ferguson, A.B.: Scoliosis
treated by the fusion operation. An end result study
of three hundred and sixty cases
J. Bone Jt. Surg. 13, 91 (1931)
18. Hippokrates: "De articulationes"
Zit. nach Moe, J.H.: Scoliosis and other spinal
deformities
W.B. Saunders Company (1978)

19. Hütter, J., Gotzen, L., Haas, N., Kellner, W.: Biomechanische Untersuchungen über die 4,5 mm Corticalis-schraube als Zugschraube
Unfallheilkunde 83, 60 (1980)
20. Michel, C.R., Onimus, M., Kohler, R.: L'opération de Dwyer dans le traitement chirurgical des Scolioses
Rev. Chir. Orthop. 63, 237 (1977)
21. Moe, J.H.: Critical analysis of methods of fusion for Scoliosis
J. Bone Jt. Surg. 40-A, 529 (1958)
22. Paré, A.: Collected works
Zit. nach Moe, J.H.: Scoliosis and other spinal deformities
W.B. Saunders Company (1978)
23. Risser, J.C.: Important practical facts in the treatment of Scoliosis
Amer. Acad. Orthop. Surg. Instructional Courses Lectures 5, 248 (1948)
24. Volkmann, R.: Resektion von Rippenbuckeln bei Scoliose
Berl. Klin. Wochenschrift 50, 18 (1889)
25. Zapfe: mündliche Mitteilung
26. Zielke, K.; Stunkat, R., Beaujan, Fr.: Ventrale Derotationsspondylodese. Vorläufiger Bericht über 26 operierte Fälle
Arch. Orthop. Unfall. Chir. 85, 257 (1976)
27. Zielke, K., Berthes, A.: VDS - Ventrale Derotations-spondylodese. Vorläufiger Bericht über 58 Fälle
Beitr. Orthop. und Traumatol. 25, (1978)

28. Zielke, K., Stunkat, R.: Ergebnisse der Ventralen Derotationsspondylodese
in: Kyphose und Skoliose, 42 (1978)
29. Zielke, K., Pellin, B.: Weiterentwicklung an Instrument und Implantaten zur operativen Behandlung der Skoliose
Z. Orthop. 114, 534 (1976)
30. Zielke, K., Stunkat, R., Duquesne, J., Beaujan, F.:
Ventrale dérotation spondylodèse
Orthopädische Praxis 11, 562 (1975)
31. Zielke, K., Stunkat, R., Delatte, P., Beaujan, F.:
Le traitement des scolioses par spondylodèse par voie antérieure avec l'instrumentation de dérotation et de lordosation. Communication.
St. Etienne. Réunion annuelle du Groupe d'Etude de la scoliose (1976)
32. Zielke, K.: VDS - Ventrale Derotationsspondylodese
Encyclopédie médico-chirurgicale (technique chirurgicale orthopédique traumatologie) (1977)

An dieser Stelle danke ich Herrn Prof. Dr. med. Witt für die freundliche Überlassung des Themas.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Dr. med. Henning Stürz sehr herzlich bedanken.

Mit großem persönlichen Engagement hat er mich wissenschaftlich beraten und mir Ratschläge zur Durchführung der Experimente und Anlage der Arbeit gegeben.

Herrn Dipl.-Ing. W. Plitz danke ich für die vielen Anregungen zur technischen Durchführung des experimentellen Teils.

LEBENS LAUF

=====

Ich wurde am 18. Dezember 1953 als Sohn des Geschäftsführers Friedrich Neumann und seiner Ehefrau Jutta, geb. Kraetsch, in Berlin geboren.

Von 1960 - 1966 besuchte ich die Nord-Grundschule in Berlin-Zehlendorf. In der Folge wechselte ich auf das Schadow-Gymnasium in Berlin-Zehlendorf, wo ich 1973 das Humanistische Abitur absolvierte.

Im Anschluß daran nahm ich 1973 das Studium der Humanmedizin an der FU Berlin auf. Physikum August 1975, Erster Teil der Ärztlichen Prüfung August 1976, Zweiter Teil August 1978.

Anschließend übersiedelte ich nach München, um das Studium an der Ludwig-Maximilian-Universität fortzusetzen.

Das Praktische Jahr absolvierte ich im Städt. Krankenhaus Landshut (Chefarzt Prof. Dr. Köhler), im Städt. Krankenhaus Ingolstadt (Chefarzt Prof. Dr. F. Eisenreich) und an der Staatlichen Orthopädischen Klinik München (Direktor Prof. Dr. A.N. Witt).

Die Approbation als Arzt erwarb ich im Dezember 1979.

Seit März 1980 bin ich Assistent an der Chirurgischen Poliklinik der Universität München (Direktor Prof. Dr. F. Holle).

